COLEÇÕES DESAFIOS PARA O SÉCULO XXI

BIOMIMÉTICA E BIOINSPIRAÇÃO:

contribuições da natureza para o desenvolvimento de produtos e tecnologias

Gabriela Rabelo Andrade

O design inspirado pela biologia tem sido considerado uma ferramenta profícua para a criatividade e a inovação em produtos e tecnologias. Todavia, problemas e soluções específicos encontrados nos seres vivos não necessariamente são extrapoláveis para outros contextos que não o da espécie e de seus ancestrais. Assim, a obra busca levantar as limitações biomecânicas e evolucionárias que podem afetar o desenvolvimento de tecnologias em biomimética.

editora UEMG

Biomimética e bioinspiração: contribuições da natureza para o desenvolvimento de produtos e tecnologias

Gabriela Rabelo Andrade

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

ANDRADE, G. R. *Biomimética e bioinspiração*: contribuições da natureza para o desenvolvimento de produtos e tecnologias [online]. Belo Horizonte: Editora UEMG, 2024, 128 p. ISBN: 978-65-86832-31-0. Available from: https://books.scielo.org/id/ngg92.
https://doi.org/10.36704/9786586832310.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribição 4.0.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimento 4.0.

COLEÇÕES DESAFIOS
PARA O SÉCULO XXI

A EdUEMG tem, em suas ações, reafirmado o compromisso com o público leitor de editar e difundir conteúdos de qualidade, sempre preservando seu caráter público e humanista, incentivando o senso crítico por parte dos cidadãos e apoiando a tomada de decisões governamentais.

Nossas coleções Desafios para o Século XXI são textos que reúnem discussões sobre as seguintes temáticas transversais: Biodiversidade, sustentabilidade e mudanças climáticas; Tecnologias digitais e sociedade; e Democracia, intolerância e violência. Cada área foi escolhida por ser um assunto relevante no contexto atual e de fundamental importância para a compreensão dos principais problemas contemporâneos enfrentados pela humanidade.

O livro *Biomimética e bioinspiração: contribuições da natureza para o desenvolvimento de produtos e tecnologias* compõe as coleções na temática Tecnologias digitais e sociedade.

UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE MINAS GERAIS | UEMG

Em 1997, no Japão, um trem-bala da linha Shinkansen tornou-se mais silencioso, veloz e econômico quando Eiji Nakatsu e sua equipe aplicaram princípios da biomimética no design. A inspiração? Um pequeno pássaro chamado martim-pescador.

Como o nome popular sugere, o pássaro é um exímio pescador e domina a técnica de mergulhar sem causar distúrbios na água. O mergulho silencioso aumenta as chances de surpreender a presa — e ele frequentemente emerge carregando um pequenino peixe.

Como esse pássaro desenvolveu tão bem essa habilidade? Esse é o resultado do longo processo de evolução natural, que combina adaptações de comportamento e forma.

Para além do martim-pescador, estima-se que a Terra possua cerca de 11 milhões de espécies, das quais conhecemos pouco mais de 2 milhões. Em cada uma dessas espécies (muitas delas sob ameaça de extinção), pode haver o potencial de revolucionar o design de novos produtos, processos e novas tecnologias através da bioinspiração.

Se olharmos mais atentamente para a natureza, podemos aprender novas formas de solucionar novos e velhos problemas e desafios de design, engenharia ou tecnologia. Quem sabe não aprenderemos também como corrigir e mitigar nosso impacto na natureza ao longo dessa jornada?

BIOMIMÉTICA E BIOINSPIRAÇÃO:
contribuições da natureza para o desenvolvimento de produtos e tecnologias

Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)

Lavínia Rosa Rodrigues
Reitora

Thiago Torres Costa Pereira
Vice-reitor

Raoni Bonato da Rocha
Chefe de Gabinete

Silvia Cunha Capanema
Pró-reitora de Planejamento, Gestão e Finanças

Vanesca Korasaki
Pró-reitora de Pesquisa e Pós-graduação

Welessandra Benfica
Pró-reitora de Graduação

Moacyr Laterza Filho
Pró-reitor de Extensão

Editora da Universidade do Estado de Minas Gerais (EdUEMG)

Conselho Editorial

Thiago Torres Costa Pereira | UEMG

Amanda Tolomelli Brescia | UEMG

Ana Elisa Ribeiro | CEFET-MG

Fuad Kyrillos Neto | UFSJ

Moacir Henrique Júnior | UEMG

Ynaê Lopes dos Santos | UFF

Thiago Torres Costa Pereira
Editor-chefe

Gabriella Nair Figueiredo Noronha Pinto
Coordenadora administrativa e editorial

COLEÇÕES DESAFIOS
PARA O SÉCULO XXI

BIOMIMÉTICA E BIOINSPIRAÇÃO:
contribuições da natureza para o desenvolvimento de produtos e tecnologias

Gabriela Rabelo Andrade

editora UEMG

BELO HORIZONTE, 2024

Expediente

Antônio de Andrade
Tainá Verona
Revisão

Thales Santos
Sofia Carvalho
Projeto gráfico e diagramação

Este livro foi submetido à avaliação por duplo parecer às cegas, feita por pesquisadores doutores, e à aprovação pelo Conselho Editorial.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença pública Creative Commons 4.0 Atribuição – Não Comercial – Sem Derivações. Direitos desta edição reservados à Editora da Universidade do Estado de Minas Gerais.

Rodovia Papa João Paulo II, 4143. Ed. Minas, 8º andar, Cidade Administrativa, bairro Serra Verde, BH-MG, CEP: 31630-900.

(31) 3916-9080 | e-mail: editora@uemg.br | editora.uemg.br

@EditoraUEMG @editora_uemg EditoraUemg Editora UEMG

A554 Andrade, Gabriela Rabelo
Biomimética e bioinspiração: cotribuições da natureza para o desenvolvimento de produtos e tecnologias / Gabriela Rabelo Andrade. Belo Horizonte: EdUEMG, 2024.
Recurso eletronico (128p. : il.)

ISBN : 978-65-86832-31-0

1. Biomimética. 2. Bioinspiração. 3. Desenvolvimento de produtos e tecnologias. I. Título.

Bibliotecário responsável: Josué Sales Barbosa CRB-6/3956

APRESENTAÇÃO

Esta obra propõe uma investigação interdisciplinar sobre biomimética e bioinspiração no design. Serão discutidas abordagens, limitações e contribuições do estudo da natureza para o desenvolvimento de novos produtos e tecnologias.

O trabalho proposto inicialmente buscava investigar a contribuição da biomimética através do acompanhamento participativo da pesquisa e desenvolvimento de um projeto bioinspirado. A empreitada, no papel, parecia simples: conceber um produto bioinspirado ao mesmo tempo em que se produziam reflexões sobre ele.

Ao longo do percurso, ficou claro que a biomimética oferecia mais perguntas que respostas e que a proposta inicial era um tanto ingênua – além de contar com uma boa dose de otimismo.

Diversos exemplos de produtos e tecnologias bioinspirados indicavam o potencial da contribuição da bioinspiração para a prática projetual. Outros, no entanto, pareciam apenas ter encontrado, no modismo exagerado que atingiu a biomimética uma história conveniente desenvolvida *a posteriori*. Em alguns casos, ainda, notava-se o afã de projetistas que, ao tratar as estruturas biológicas com pouca atenção, desenvolveram projetos pouco expressivos ou pouco eficientes. Curiosamente, havia também aqueles idealizados a partir de compreensões equivocadas ou já superadas sobre as estruturas biológicas – e que mesmo assim funcionavam. Ficou evidente, então, que a biomimética (e, muito antes, a natureza) apresenta incontáveis peculiaridades e que tratá-la com um olhar puramente funcionalista, ingênuo ou

desatento poderia levar a resultados incompletos. Assim, perguntas mais maduras foram formuladas:

- O que a biologia e a tecnologia têm em comum? É possível que conhecimentos obtidos na natureza sejam transmitidos para a tecnologia?

- A contribuição da natureza para a atividade projetual está puramente na sua (bio)diversidade? Qualquer ser vivo será capaz de fornecer boas soluções para a biomimética? Os seres extintos são, necessariamente, fracassos da natureza?

E, por fim:

- Quais as limitações da biomimética? Quais restrições conceituais, materiais, físicas, desenvolvimentais (entre outras) permeiam a evolução dos seres vivos? Quais observações devem pautar os projetos bioinspirados?

O método de investigação foi essencialmente epistemológico, consistindo no levantamento, organização e reflexão sobre assuntos diversos nas áreas da biologia, tecnologia, antropologia, biomecânica, mecânica de fluidos, entre outras.

Situando-se na interseção entre muitas áreas, a escrita teve de ser cuidadosa, porém breve, de modo que o texto não se tornasse exaustivo ou inacessível a um público amplo. Em muitos momentos, fiz uma escolha consciente de simplificação, privilegiando clareza e didática, visto que a discussão desta obra se situa predominantemente na área do design.

Este livro não pretende ser um passo a passo para o desenvolvimento de projetos bioinspirados. Encontram-se aqui discussões, reflexões, críticas e ponderações sobre a biomimética e o design bioinspirado que podem contribuir para a prática projetual.

Certamente não é o objetivo encerrar as discussões propostas; tampouco responder inteiramente todas as perguntas. Os temas abordados serviram como ponto de partida para a organização de tópicos de interesse, conceitos e provocações capazes de contribuir para o desenvolvimento de projetos bioinspirados, bem como para a construção e ampliação, de forma geral, da discussão que contempla essa área.

O primeiro capítulo, *Biomimética: métodos, abordagens e taxonomia*, traz uma revisão dos conceitos, métodos e abordagens e apresenta a terminologia usualmente adotada nos estudos de design bioinspirado.

O segundo capítulo, *Natureza vs. tecnologia; Natureza + tecnologia*, levanta conceitos iniciais em biologia evolutiva e em tecnologia e discute as semelhanças, diferenças e como evoluem a natureza e a tecnologia. O capítulo discute, portanto, evolução e seleção natural como processos inerentes à vida, questionando as atribuições teleológicas, tanto para a natureza, quanto para a tecnologia.

O terceiro capítulo*, Divergência, convergência e as limitações do design bioinspirado*, discute questões globais pertinentes à transposição de conceitos da natureza para a área do design,

pontuando conceitos centrais em biomecânica, tamanho e escala e materiais.

Ao final do livro, teço algumas considerações importantes sobre os temas abordados.

INTRODUÇÃO

Ao longo da evolução, os organismos vivos se deparam com inúmeros desafios e pressões seletivas, das quais sobressaem os mais preparados,[1] deixando pelo caminho espécies extintas, registros fósseis, e resultando na nossa biodiversidade atual. Nos referimos a esse processo como evolução adaptativa.[2] Os frutos dessa trajetória de mais de 3 bilhões de anos da vida na Terra habitam os mais diversos ambientes: terra, água, ar – das altas montanhas até o fundo do mar, passando também por ambientes extremos como geleiras, vulcões, gêiseres e lagos hipersalinos. De toda a biodiversidade, conhecemos ainda muito pouco: são apenas 2 milhões de espécies descritas entre as 11 milhões estimadas.

No que já conhecemos da natureza, identificamos propriedades inspiradoras como beleza, sofisticação, miniaturização, hibridismo, resistência e adaptabilidade (Sanchez; Arribart; Guille, 2005). Nos materiais biológicos, por exemplo, encontramos propriedades físicas excepcionais, como elevada dureza, flexibilidade, resistência à pressão ou à compressão, entre outras. Essas características chamam a atenção especialmente se considerarmos a gama limitada de elementos químicos que compõem a maior parte dos seres vivos:

1 Diz-se "mais preparados" em relação ao contexto ecológico, ambiental e/ou geológico.

2 Evolução adaptativa não deve ser confundida com o conceito lamarckiano de adaptação. Evolução adaptativa refere-se ao processo pelo qual características genéticas favoráveis são selecionadas naturalmente e ao longo do tempo, aumentando a adaptação de uma espécie ao seu ambiente. O conceito é fundamentado na ideia de seleção natural – proposto independentemente tanto por Charles Darwin quanto por Alfred Russel Wallace. Em contraste, a teoria proposta no século XIX pelo biólogo Jean-Baptiste Lamarck para explicar a evolução dos seres vivos postulava que os organismos se adaptariam durante suas vidas ao seu ambiente e posteriormente transmitiriam as características adquiridas para seus descendentes.

carbono, nitrogênio, cálcio, hidrogênio, oxigênio, silício e fósforo – apenas 7 entre os 92 elementos que ocorrem naturalmente. No corpo humano não é diferente: 96% de nossa massa é composta por esses mesmos 7 elementos. E apenas cinco deles são necessários para formar o ubíquo DNA.

Além do minimalismo em seus "ingredientes", a forma de processamento dos elementos que compõem os seres vivos está restrita à temperatura ambiente – e, muitas vezes, ao meio aquoso. Desde os músculos, passando por tecidos moles e chegando aos ossos, conchas e carapaças, as propriedades dos materiais biológicos resultam de composições, formas e estruturas complexas que combinam e recombinam elementos de maneira inusitada – dando origem a uma miríade de resultados que não cessa de nos surpreender.

A seda das aranhas da espécie *Caerostris darwini*, por exemplo, é o material de maior tenacidade conhecido até o momento: 45 vezes maior que a do aço de alta resistência e 4,5 vezes maior que a do Kevlar K49 (uma fibra sintética de alta performance no estado da arte da indústria de materiais). No caso das sedas de aranhas, a produção desses materiais de alta performance pode ocorrer bem ali em nossos jardins – em temperatura ambiente e em frente aos nossos olhos.

Design inspirado pela natureza

Observações como essas fizeram surgir propostas de replicar estruturas biológicas a partir da observação de novos conceitos e paradigmas "projetuais" vindos da natureza. O design inspirado pela biologia recebe nomenclaturas como biônica,

biomimética e bioinspiração, entre diversas outras – e tem sido considerado uma ferramenta profícua para a criatividade e a inovação em novos produtos e tecnologias.

Na década de 1940, Georges de Mestral intrigou-se com as persistentes sementes de arctium, planta pertencente à família Asteraceae, que grudavam em suas roupas e nos pelos de seu cão. Mestral replicou a estrutura da superfície dessas sementes em materiais sintéticos para criar o produto que conhecemos como "Velcro".

As cores de borboletas e mariposas não vêm de pigmentos, e sim da interação da luz com a morfologia da superfície das asas desses animais. Painéis fotovoltaicos inspirados nessas superfícies biológicas são capazes de aumentar em até 200% a absorção de luz. Também surgiram dessa inspiração protótipos de tecnologias para telas e *displays* eletrônicos, além de técnicas de impressão sem tinta.

Já pensou em como as baleias jubarte, medindo cerca de 15 metros e pesando mais de 30 toneladas, conseguem nadar a uma velocidade de até 27km/h, completando anualmente grandes rotas migratórias, partindo, por exemplo, da costa do estado da Bahia até chegar à Antártida – e de volta outra vez? Em vez de nadadeiras lisas e com o visual *streamlined*[3] que conhecemos, estas gigantes possuem a borda anterior da nadadeira peitoral ondulada, o que reduz a turbulência e

3 *Streamlined* refere-se às formas aerodinâmicas. Enquanto estilo internacional de arquitetura e design, popularizou-se na década de 1930 como um desdobramento do movimento *Art Déco*. O movimento Streamline Moderne, ou simplesmente Streamline, foi fortemente influenciado pelo design de linhas aerodinâmicas presentes em carros e aeronaves que começavam a surgir e a se popularizar naquela época.

o arraste na água. Em pás de turbinas eólicas experimentais, o design bioinspirado nas baleias jubarte foi capaz de reduzir em 30% o arraste, em 20% o ruído e aumentar em 20% a energia gerada.

Em 2011, o Biomimicry Guild (hoje chamado Biomimicry 3.8), instituto norte-americano de consultoria em inovação através da bioinspiração, criador do *Biomimicry Innovation Method* (ou método BIM – Método de Inovação por Biomimetismo, em tradução livre) – registrou que cerca de 90% dos produtos e processos criados foram totalmente novos para seus clientes – sendo alguns deles grandes empresas como Boeing, General Electric, NASA e Nike (Gebeshuber, 2011). Deste instituto também nasceu o Ask Nature (ou Pergunte à Natureza, em tradução livre), um portal *on-line* de livre acesso que cataloga e descreve o funcionamento de diversas estruturas biológicas e de processos da natureza.

Embora os métodos de biomimética tenham sido majoritariamente difundidos no século XX, a literatura aponta que a natureza já servia de inspiração para cientistas como Leonardo da Vinci desde o Renascimento. Registros apontam também que em 1867 o horticultor e paisagista francês Joseph Monier inventou o concreto armado a partir da observação da estrutura das *Opuntia*, um gênero botânico da família dos cactos – Cactaceae (Gruber, 2011b). Também há relatos de que Gustave Eiffel se inspirou na estrutura do fêmur humano para a idealização da Torre Eiffel, construída entre 1887 e 1889 (Ayre, 2006 *apud* Biggins; Hiltz; Kusterbeck, 2011). No século XX, o tema avançou com o trabalho do biólogo e matemático escocês D'Arcy Thompson, que publicou em

1917 o livro *On Growth and Form* (ou *Sobre o Crescimento e Forma*, em tradução livre), elaborado a partir de seus estudos matemáticos e geométricos das proporções da natureza. Na obra, Thompson analisa padrões de crescimento e formas das estruturas biológicas, encontrando constantes matemáticas que apoiam suas premissas de que estes não são mero fruto do acaso e sim o produto de processos dinâmicos de forças que moldam cada um dos estágios do crescimento das estruturas naturais.

É comum pensarmos a natureza e evolução dos seres vivos como um longo processo em direção única, em busca de soluções cada vez melhores e mais otimizadas. Por isso, deixamos aqui nosso primeiro alerta: a evolução natural não deve ser entendida puramente como progresso.

Evolução natural *vs.* progresso

Tanto "evolução" quanto "progresso" são termos contaminados pelas aspirações de sociedades ocidentais pós-revolução industrial. A evolução natural, conforme teorias desenvolvidas por Charles Darwin e Alfred Russel Wallace, é um processo de adaptação a um cenário ambiental – seja ele qual for. Espécies que habitavam a Ilha das Flores (Indonésia) há milhares de anos, por exemplo, evoluíram corpos com tamanhos e demandas calóricas reduzidas. Esta foi provavelmente a forma de se adaptarem à escassez alimentar e a outros desafios da vida insular. É possível que um olhar menos atento classifique a trajetória dos já extintos habitantes da ilha como exceção ou tropeço evolucionário. No entanto, este é apenas mais um corriqueiro exemplo da seleção natural em

curso. O fato de esse caso nos chamar a atenção diz muito mais sobre nós mesmos do que sobre o fato em si: estamos tão acostumados aos paradigmas e estéticas ocidentais, pós-industriais e do consumismo que, por vezes, fica difícil pensar no menor sendo o ótimo.

No design não é diferente – desde o início do século XX com o movimento "less is more" (menos é mais) difundido por Mies van der Rohe,[4] passando por Dieter Rams[5] e Jonathan Ive,[6] o minimalismo ainda representa um forte contraponto ao paradigma vigente –, Marie Kondo[7] que o diga.

Ainda no exemplo da Ilha das Flores, poder-se-ia argumentar que esses seres – entre eles hominídeos e elefantes – já não

4 Nascido na Alemanha em 1886, Ludwig Mies van der Rohe foi pioneiro na arquitetura moderna. Os projetos de Mies van der Rohe incorporaram o *ethos* minimalista, caracterizado por linhas limpas, espaços abertos e rejeição à ornamentação. Ele cunhou a célebre frase "menos é mais" para encapsular sua crença de que a arquitetura deve alcançar o máximo efeito com meios mínimos.

5 Nascido na Alemanha em 1932, Dieter Rams é reconhecido por seu trabalho como designer industrial para a Braun e sua filosofia de "menos, mas melhor", que acreditava nas vantagens de se eliminar elementos desnecessários para alcançar clareza e funcionalidade, enfatizando linhas limpas, simplicidade e design centrado no usuário. Sua influência se estende muito além do design de produtos, moldando o amplo discurso sobre minimalismo em diversos campos criativos, desde a arquitetura até o design gráfico.

6 Nascido no Reino Unido em 1967, Jonathan Ive é um aclamado designer industrial, celebrado por sua passagem pela Apple. Ive acredita em criar produtos que integram forma e função, em que cada detalhe tem um propósito. Sua colaboração com Steve Jobs resultou em produtos icônicos como o iPhone, o iPad e o MacBook.

7 Nascida no Japão, em 1984, Marie Kondo tornou-se sinônimo do movimento de estilo de vida minimalista. Através de seu método KonMari, a autora e consultora em organização defende a sistematização e a arrumação de pertences com base em se eles "despertam alegria". A abordagem de Kondo vai além da simples arrumação; ela promove uma conexão mais profunda com os pertences de alguém e incentiva a consciência no consumo.

mais existem. Se essas espécies eram propriamente evoluídas, por que, então, foram extintas?

Aqui deixamos nosso segundo alerta: extinção não quer dizer necessariamente inadequação. Aliás, estamos falando de adequação a quê?

Seriam os fósseis realmente fracassos da natureza?

Não é incomum encontrarmos na literatura sobre bioinspiração escritos que se referem aos fósseis e animais extintos como fracassos da natureza em termos de forma e função – ou ainda de design.[8] Ainda nessa perspectiva, as espécies atuais seriam o legado de sucesso dos experimentos da natureza com princípios físicos, químicos e mecânicos após bilhões de anos de tentativa e erro.

Seriam então os fósseis tentativas fracassadas da natureza?

Se considerarmos o panorama atual da Terra, é possível que os seres já extintos pareçam inadequados ou incapazes de sobreviver – deixados à margem do caminho pela incólume seleção natural. No entanto, em nossa visão antropocêntrica, muitas vezes nos esquecemos de considerar todo o horizonte de evolução natural e mudanças no planeta – seja na água, na terra ou no ar. Tomamos como único o momento

8 Podemos encontrar, em textos sobre bioinspiração, a palavra "design" sendo utilizada para se referir à forma, morfologias e estruturas de seres vivos. Esta palavra deve ser utilizada com cautela, visto que nas áreas projetuais ela implica intenção, propósito e atividade projetual – um paradigma muito diferente daquele que consideramos quando falamos da origem e evolução das espécies.

que vivemos. Porém, desde o seu surgimento, há mais de 4 bilhões de anos, nosso planeta mudou muito – e continua mudando.

Surgida há mais de 3 bilhões de anos, a vida no planeta começou em oceanos quentes e tóxicos.[9] A atmosfera, como a conhecemos, é resultado da oxigenação por esses organismos primitivos. A Terra – originalmente uma grande massa continental que foi se separando até dar forma aos continentes atuais – também se transformou, formando desertos, florestas e alagados, entre outros tipos de ambientes. Ao longo desse processo, a vida enfrentou e enfrenta adversidades – desde as pequenas e contínuas mudanças aos grandes cataclismas e acidentes cósmicos. "Nada é permanente, exceto a mudança", disse o filósofo Heráclito[10] – o que representa bem a essência da natureza.

O que geralmente compreendemos como biodiversidade é apenas um quadro, uma "fotografia" ou recorte de uma trajetória mais longa e complexa. Assim, as espécies extintas são "fotos antigas" – registros de um longo e permanente processo de mudança, adaptação e evolução das espécies e de acertos da natureza em outras dinâmicas, cenários, panoramas e horizontes.

Em alguns casos, passado e presente não são mutuamente excludentes. As corcovas de camelos e dromedários são um

9 Tóxicos para nós, seres humanos, e para a maioria das espécies existentes hoje.

10 Heráclito nasceu na cidade de Éfeso em 540 a.C e suas ideias são conhecidas através de fontes doxográficas (que consistem na transcrição não literal das ideias de um escritor por meio da interpretação de outro escritor).

ótimo exemplo disso. Você provavelmente ouviu, quando criança, que esses animais armazenam água em suas corcovas. Na realidade, encontra-se ali uma rica reserva de energia em forma de gordura – que, além de prover alimento em períodos de escassez, ajuda a manter regulada sua temperatura e evita a perda de água em ambientes extremos como o deserto. No entanto, o que poucos sabem é que durante o último período glacial, há mais de 40 milhões de anos, em resposta aos ambientes gelados da América do Norte, os ancestrais dos camelídeos atuais originaram-se e evoluíram muitas estruturas que os fazem bem adaptados aos desertos.

Assim como essas adaptações serviram bem aos camelos ao longo de 40 milhões de anos – primeiro sob as intempéries do gelo, e, posteriormente, sob as adversidades das areias escaldantes –, podemos também aplicar exemplos da evolução das espécies que no passado não tiveram êxito, mas que caso fossem inseridas em novos cenários e contextos teriam boas chances de sucesso.

A vida parece sempre capaz de mudar, de adaptar e encontrar um meio de sobrevivência – "life finds a way", dizia Dr. Ian Malcolm, personagem ficcional do filme *Jurassic Park*. E me parece uma questão de sabedoria ver, enxergar e admirar os tantos meios encontrados pela natureza para tão diferentes fins.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Bioinspiração: métodos, abordagens, taxonomia e um pouco de história **23**

1.1 Origem, terminologia e nomenclatura 24

1.2 Abordagens metodológicas da biomimética 32

1.3 Métodos projetuais e biomimética 39

Capítulo 2 – Natureza *vs*. tecnologia; Natureza + tecnologia **41**

2.1 Evolução natural, diversidade e variabilidade 42

2.2 Tecnologia e evolução tecnológica: uma breve introdução 46

2.3 Natureza x tecnologia: variação, invenção e mutação 50

2.4 Hibridação 54

2.5 Acumulação e repertório 57

2.6 Evolução, progresso e o mito da teleologia 59

2.7 Diversidade, variabilidade e evolução natural 61

Capítulo 3 – Divergência, convergência e as limitações do design bioinspirado **63**

3.1 Biomecânica e o impacto do tamanho dos seres vivos 64

3.2 Convergência 78

3.3 Percursos evolutivos e a geometria da evolução 93

3.4 Limitações, viabilidade e convergência como fatores-chave 104

Capítulo 4 – Forma, função e limitação **105**

Conclusões **111**

Referências **115**

Glossário **121**

Sobre a autora **125**

Capítulo 1

Bioinspiração: métodos, abordagens, taxonomia e um pouco de história

Neste capítulo, apresentarei uma revisão dos métodos, abordagens e aplicações da bioinspiração encontradas na literatura, bem como um levantamento das nomenclaturas e dos termos adjacentes.

1.1 Origem, terminologia e nomenclatura

O termo *bionics* (biônica) foi cunhado em 1960 por Jack Steele, major da Força Aérea norte-americana, sendo usado como referência à integração entre a biologia e a engenharia, a fim de descobrir como a natureza solucionou problemas ao longo de milhões de anos de evolução, com o intuito de transmitir esse conhecimento para a produção de artefatos pelo homem (Bar-Cohen, 2011).

Quase uma década depois, em 1969, o termo *biomimetics* (biomimética) foi utilizado por Otto H. Schmitt no título de um artigo e designava uma nova ciência, cujo objetivo era estudar e replicar os métodos, projetos e processos da natureza. A concepção da biomimética por Schmitt foi fruto de sua pesquisa de doutorado de 1957, na qual tentava desenvolver um dispositivo físico capaz de imitar o comportamento de um nervo (Vincent, 2006). No princípio de sua pesquisa, o autor situava seu trabalho como uma área ainda pouco explorada da biofísica. Assim, somente doze anos depois o termo biomimética foi de fato publicado e popularizado.

Sobretudo através do trabalho do biólogo e engenheiro físico Werner Nachtigall, considerado o fundador dessa ciência na Alemanha, o termo *bionics* (biônica) foi reinterpretado no idioma alemão como *bionik*, fusão das palavras *biology*

(biologia) e *technik* (tecnologia) (Gruber 2011a; 2011b). Em 1969, Nachtigall se tornou professor e diretor do Instituto de Zoologia da Universidade do Sarre (Alemanha) e supervisionou, entre 1990 e 2002, o Programa de Pós-graduação em Biologia Técnica e Biônica, tendo também presidido a Sociedade para a Biologia Técnica e Biônica. O autor se posicionou contrário ao emprego de termos como *biomimetics* e *biomimicry*, pois têm em sua etimologia a palavra "mimese", que significa "imitação". Em entrevista à revista alemã *Bauwelt*,[11] o pesquisador caracteriza como ingênua a forma como a biônica é frequentemente abordada, uma vez que a natureza não pode ser sumariamente copiada. As inúmeras maneiras exibidas pela natureza de solucionar problemas, por outro lado, podem ser exploradas pelos pesquisadores para a concepção de projetos. Ou seja, para ser considerado "biônico", um produto deveria ser desenvolvido por meio da aplicação do método pelo "biólogo técnico". Assim, Nachtigall estabelece o pesquisador-desenvolvedor capaz de olhar para a biologia através do ponto de vista técnico como figura central no desenvolvimento de produtos, mecanismos ou tecnologias. De acordo com Nachtigall, a biologia técnica e a biônica pertencem uma à outra; são duas facetas que não podem ser separadas.

Ainda que haja ressalvas como as de Nachtigall, os termos biônica e biomimética (isto é, tanto *biomimicry* quanto *biomimetics)* geralmente são utilizados sem distinção.

11 SCHULTZ, Brigitte; NACHTIGAL, Werner; POHL, Göran. Die Natur zu kopieren ist völlig sinnlos. Interview mit Werner Nachtigal und Göran Pohl. Bauwelt. *[S. l.]*, 10 abr. 2023. Disponível em: https://www.bauwelt.de/themen/Die-Natur-zu-kopieren-ist-voellig-sinnlos-Interview-Werner-Nachtigal-Goeran-Pohl-Bionik-Architektur-2115402.html. Acesso em: 7 set. 2023.

Em uma abordagem um pouco mais ampla e flexível, encontramos o termo *bioinspiration* (ou bioinspiração, em tradução livre), aplicado para descrever a inspiração na natureza e na biologia para o desenvolvimento de artefatos ou tecnologias pelo homem (Biggins; Hiltz; Kusterbeck, 2011).

Biomimicry[12] (biomimetismo ou bioimitação, em tradução livre) é um termo cunhado por Janine Benyus, autora de diversos livros na área e cofundadora do Biomimicry Institute. Benyus propõe uma expansão do conceito clássico de biomimética e biônica através da delimitação de três abordagens: [1] ***natureza como modelo*** – que se assemelha aos conceitos clássicos de *biomimetics* e *bionics*; [2] ***natureza como medida*** – que utiliza os padrões naturais como critérios para julgar a riqueza de uma inovação; e [3] ***natureza como mentora*** – que estabelece uma nova maneira de ver e valorizar a natureza pela biomimética, isto é, não mais "o que podemos extrair dela" e sim "o que podemos aprender com ela" (Benyus, 2002).

No conceito de *biomorphism* (biomorfismo, em tradução livre), as formas da natureza servem de inspiração estética e semântica para a criação de produtos, construções e obras de arte. Esse é, de acordo com Kuhlmann (2001), um dos mais antigos e fundamentais conceitos estéticos na arte e na arquitetura ocidentais. O *Art Nouveau*, estilo artístico e

12 Os termos biomimetics e biomimicry foram traduzidos de maneira diferente neste livro, a partir da consulta a referências etimológicas e a falantes nativos da língua inglesa. Embora ambos os termos envolvam imitação, eles diferem em sua abrangência e aplicação. O termo *mimicry* é um sufixo mais específico relacionado à imitação e semelhança observadas no mundo natural, especialmente no contexto da biologia e ecologia. Já o termo *mimetics* traz consigo um conceito mais amplo, capaz de englobar o estudo da imitação e replicação.

arquitetônico que floresceu na Europa especialmente entre os anos de 1890 e 1920, é um exemplo. O biomorfismo se vale de estudos de proporção e harmonia na natureza e sua aplicação no design, arquitetura e composições visuais diversas. Nesses estudos, destaca-se a identificação de uma aparente unidade indivisível diretamente relacionada à beleza da forma, denominada número áureo, uma constante algébrica cujo valor arredondado para três casas decimais é 1,618 (Thompson, 2007; Doczi, 1990).

Uma vertente mais tecnológica do biomorfismo é o *Morphogenetic Design* (ou Design Morfogenético, em tradução livre) – um processo projetual que, na fase de concepção, utiliza recursos computacionais para emular padrões de crescimento e hierarquia (Kulfan; Colozza, 2012). Esses padrões são encontrados na formação estrutural de organismos e no crescimento e diferenciação dos tecidos nos seres vivos. A emergência desses padrões é, sabidamente, fruto de um processo de crescimento interativo *bottom-up* (de baixo para cima) e hierárquico. Apesar de essa área se apoiar em ferramentas computacionais mais recentes, é inegável que muitas dessas bases foram construídas a partir de precursores como Ernst Haeckel (1834-1919) e D'Arcy Thompson (1860-1948). Apoiado por recursos computacionais avançados, esse campo tecnológico é capaz de expandir as possibilidades de simulação, mutação e evolução de formas, a fim de resolver problemas de design. Na concepção de Hensel, Menges e Weinstock (2006), trabalhar com esse processo no design torna o resultado melhor a cada etapa, com sua performance e capacidades cada vez mais inter-relacionadas de uma maneira coerente e sinérgica. Essa concepção generativa

contrasta com os processos clássicos projetuais *top-down* (de cima para baixo) – perspectiva na qual os processos se apoiam em escolhas conscientes, "vindas de cima".

1.1.1 Conceitos adjacentes, conjunções e subdivisões

Kulfan e Colozza (2012) organizaram os conceitos adjacentes à biomimética em *bionics* (biônica), *biomimicry* (biomimetismo), *neo-bionics* (neobiônica), *cybernetics* (cibernética), *pseudo-bionics* (pseudobiônica) e *non-bionics* (não biônica), classificando-os da maneira a seguir:

- **Biônica** – inspiração visual das formas, projetos e movimentos encontrados na natureza;
- **Biomimetismo** – inspiração conceitual a partir da compreensão de processos que ocorrem na natureza;
- **Neobiônica** – aplicação da computação para gerar algoritmos e processos de otimização baseados na natureza;
- **Cibernética** – inspiração obtida a partir de engenharia reversa dos projetos da natureza;
- **Pseudobiônica** – soluções projetuais desenvolvidas independentemente da biomimética, mas que foram confirmadas a partir da observação da natureza;
- **Não biônica** – inspiração obtida independentemente da natureza.

Petra Gruber (2011a) também organiza os significados de termos que ocorrem em conjunção com a biônica, sendo eles:

- **Biomorfologia** – ciência da construção e da organização das coisas vivas e de seus componentes, por exemplo órgãos, tecidos e células;
- **Morfologia estrutural** – referência ao design funcional na tecnologia e à anatomia funcional na biologia;
- **Micromorfologia** – exame e descrição da forma dos objetos microscópicos, resultando em um achado de formas funcionais;
- **Biomecânica** – aplicação das leis físicas da mecânica ao exame dos objetos naturais;
- **Biofísica** – exame e descrição de objetos biológicos com os termos e métodos da física;
- **Biotecnologia** – exploração dos objetos biológicos usando métodos técnicos. Recentemente a noção deste conceito modificou-se em direção às tecnologias que fazem uso de organismos com o intuito de gerar produtos bioquímicos, como enzimas, drogas e fármacos, além de abranger a pesquisa com organismos geneticamente modificados.

O fortalecimento das pesquisas em biotecnologia, de acordo com Biggins, Hiltz e Kusterbeck (2011), tem contribuído de maneira consistente para popularizar a bioinspiração. De acordo com os autores, a área contribui para a biomimética na medida em que promove a compreensão do funcionamento

dos processos e sistemas na natureza, gerando conceitos que podem ser assimilados e adaptados para uma vasta gama de aplicações. Além do conhecimento gerado, que embasa a compreensão dos organismos, o avanço da biotecnologia viabiliza tecnologicamente a materialização de conceitos bioinspirados (Biggins; Hiltz; Kusterbecket, 2011). Os autores destacam também dois termos correlatos à biomimética (bioimitação ou bioinspiração também são termos sinônimos para os pesquisadores) e fortemente ligados à biotecnologia, sendo eles:

- **Materiais bioderivados** – materiais feitos a partir de organismos vivos;

- **Biofabricação** – qualquer processo que utilize células, vírus, proteínas, biomateriais ou compostos bioativos como componentes para fabricação de modelos biológicos avançados, sistemas médico-terapêuticos e sistemas biológicos para diversas aplicações.

Lin e Meyers (2005) abordam a biomimética como uma área interdisciplinar e tecnológica entre a ciência dos materiais e a biologia, e retomam a classificação proposta por Sarikaya (1994, *apud* Lin; Meyers, 2005) que divide a biomimética em bioimitação e bioduplicação – *biomimicking* e *bioduplication*, respectivamente. O primeiro termo denomina o entendimento dos sistemas e a aplicação de conceitos através de materiais sintéticos usando a tecnologia atual. O segundo refere-se um estágio mais avançado, no qual novos métodos, como a engenharia genética, serão usados para a produção de uma nova classe de materiais.

Considerando as possibilidades da bioduplicação (*bioduplication*), inovações tecnológicas futuras podem ser conjecturadas no processo produtivo de novos produtos. Como exemplo, um carro cuja lataria não é fabricada, mas cultivada, tal como se formam a concha dos moluscos ou ossos humanos no processo de biomineralização (em que um organismo vivo forma aglomerados minerais). Apesar de parecer uma realidade distante, já se pode vislumbrar um princípio dessa perspectiva tecnológica na fabricação de materiais como o APHB, [poli (ácido 3-hidroxibutírico)], polímero termoplástico produzido por organismos vivos que se degrada no solo ou no mar a partir da ação de uma enzima (PHB depolimerase) presente em bactérias e fungos (Sanchez; Arribart; Guille, 2005). Indo ainda mais longe, podemos lembrar que o fio da seda nada mais é que um filamento de proteína sintetizado por uma espécie de lagarta domesticada há cerca de 3 mil anos pelos chineses. Um novo formato de produção apoiada pela biotecnologia transcenderia em muito as práticas vigentes na indústria e facilitaria a integração das cadeias de produção com os ciclos naturais. Poderíamos, quem sabe, atingir uma nova fronteira de biocompatibilidade ou de não interferência, conforme proposto por Manzini e Vezzoli (2005).

Ao longo desta obra, serão utilizados os termos biomimética e bioinspiração com o intuito de traduzir de um modo geral os termos *biomimetics*, *bionics*, *bioinspiration* e *biomimicry*. É importante ressaltar, no entanto, que as evoluções conceituais propostas a partir do termo *biomimicry* não são derivadas somente de uma mudança de pensamento na área, mas sim da consonância entre os pensamentos

contemporâneos associados às noções de ecologia e sustentabilidade nas mais diversas áreas. Cabe, por fim, reforçar que, embora as ressalvas pontuadas por Werner Nachtigall em relação à impossibilidade de imitação literal da natureza (que desaconselhariam o uso do termo biomimética) representem uma razão concreta, biomimética foi adotado neste livro como sinônimo de biônica.[13]

1.2 Abordagens metodológicas da biomimética

A aplicação da biomimética no desenvolvimento de novos produtos e tecnologias é em geral descrita através de duas abordagens metodológicas. A primeira abordagem parte de um problema tecnológico ou de design, a partir do qual é realizada uma busca por situações análogas na natureza e das alternativas encontradas para solucioná-lo. A segunda parte do estudo da natureza para então encontrar aplicações tecnológicas para as estruturas que foram objeto de análise (Figura 1 e Quadro 1).

13 O termo biônica não havia sido adotado inicialmente neste livro em função de sua aplicação como sinônimo de prótese ou órtese tecnológica com propriedades superiores às orgânicas, sobretudo em obras de ficção científica das décadas de 1980 e 1990 e no imaginário popular.

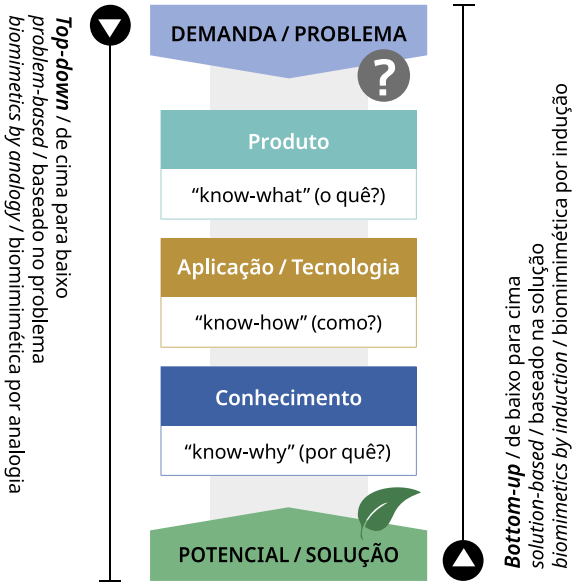


Figura 1: Síntese das duas abordagens da biomimética (*top-down* e *bottom-up*) descritas por autores da área

Fonte: Elaborado pela autora.

Abordagem baseada na demanda	Abordagem baseada na biologia	Autores
top-down (de cima para baixo)	*bottom-up* (de baixo para cima)	Speck e Harder (2006 *apud* Gruber, 2011a)
problem-based (baseado em problemas)	*solution-based* (baseado em soluções)	Vattam *et al.*, 2007
biomimética por analogia	biomimética por indução	Gebeshuber e Drack (2008 *apud* Gebeshuber, 2011)

Quadro 1: Síntese das principais abordagens e nomenclaturas na biomimética descritas por autores da área

Fonte: elaborado pela autora.

Speck e Harder classificam os métodos, respectivamente, em *top-down* e *bottom-up* (2006 *apud* Gruber, 2011a). Pesquisadores do Centro de Design Biologicamente Inspirado (Center for Biologically Inspired Design), no Instituto de Tecnologia da Georgia (Estados Unidos), adotam os termos *problem-based* (baseado em problemas) e *solution-based* (baseado em soluções) (Vattam *et al.*, 2007). Enquanto Gebeshuber e Drack denominam as abordagens como biomimética por analogia e biomimética por indução (2008 *apud* Gebeshuber; Majlis; Stachelberger, 2011).

Gebeshuber, Majlis e Stachelberger (2011) aplicam o BIM, método caracterizado como *problem-based* ou *top-down*, composto por quatro passos:

- *Identify function* – identificar o problema/problematizar;
- *Biologize the question* – "biologizar" a questão;
- *Find nature's best practices* – encontrar as melhores práticas da natureza; e
- *Generate Process/Product Ideas* – geração de ideias para o processo/produto.

O trabalho de Parvan, Schwalmberger e Lindeman (2011) propõe uma abordagem combinada, de forma que o método seja intuitivo tanto para biólogos quanto para engenheiros. No modelo proposto, ambos trabalham em paralelo: engenheiros descrevem demandas da engenharia, enquanto biólogos descrevem soluções interessantes encontradas na natureza. Assim, as propostas emergem dos pares "demanda e solução", que prosseguem através de uma busca por

analogias e similaridades para formarem posteriormente princípios de design bioinspirado.

Para além do que concerne à abordagem metodológica, alguns autores procuraram avançar na compreensão dos contextos de pesquisa, desenvolvimento e aplicação das soluções, ao que vamos tratar por quadro teórico (referente ao termo inglês *framework*).

Ahmar (2011) organiza e classifica a atividade projetual em biomimética quanto ao nível (*level*) e ao subnível (*sublevel*). O primeiro se refere à escala da qual se originam as soluções de design: desde as estruturas de um determinado organismo, passando por seu comportamento ou abarcando o complexo funcionamento de um ecossistema. O segundo está relacionado ao âmbito de aplicação da bioinspiração, partindo da forma à pura função do projeto (Figura 2).

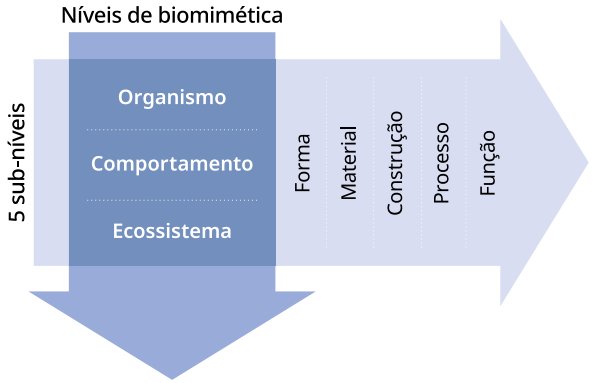


Figura 2: Abordagens em biomimética propostas por Ahmar (2001)
Fonte: elaborado pela autora a partir de Ahmar (2011, p. 14).

Biggins, Hiltz e Kusterbeck (2011) pontuam a necessidade de um quadro teórico para organizar o problema, sintetizando em diferentes eixos as pesquisas que têm sido realizadas na área de bioinspiração.

O estado da arte na área revela a existência de esforços contínuos na elaboração de métodos projetuais, geralmente adaptados a partir de técnicas tradicionais de design que são, em sua maior parte, lineares e baseados em etapas discretas e delimitadas. Há que se considerar, no entanto, que essas são tentativas de organizar logicamente um processo contínuo e não-linear, intrinsecamente ligado à criatividade – processo mental individual ainda pouco compreendido, ao qual alguns autores da área de metodologia em design se referem como um "salto ao vazio" (Morales, 1989) ou "Caixa Preta" (do inglês, *Black Box*) (Howard; Culley; Dekoninck, 2008). Seguir à risca algum dos métodos propostos na literatura pode garantir que se chegará a um resultado, mas não necessariamente que será considerado "bom".

A compreensão dos organismos em estudo parece fundamental para a transposição de conceitos e mecanismos para os artefatos tecnológicos. Uma observação descuidada pode levar a resultados pouco expressivos, como no trabalho de Hu *et al.* (2009) que exemplifica a questão. O autor e sua equipe procuraram desenvolver uma nadadeira ondulatória baseada na nadadeira dorsal dos peixes *Gymnarchus niloticus* (Figura 3b). Após uma série de experimentos e medições executados através de método fielmente conduzido (Figura 3a), a equipe obteve um resultado pouco relevante do ponto de vista mecânico, o que buscaram corrigir com novos

testes usando diferentes filmes plásticos em substituição à membrana da nadadeira.

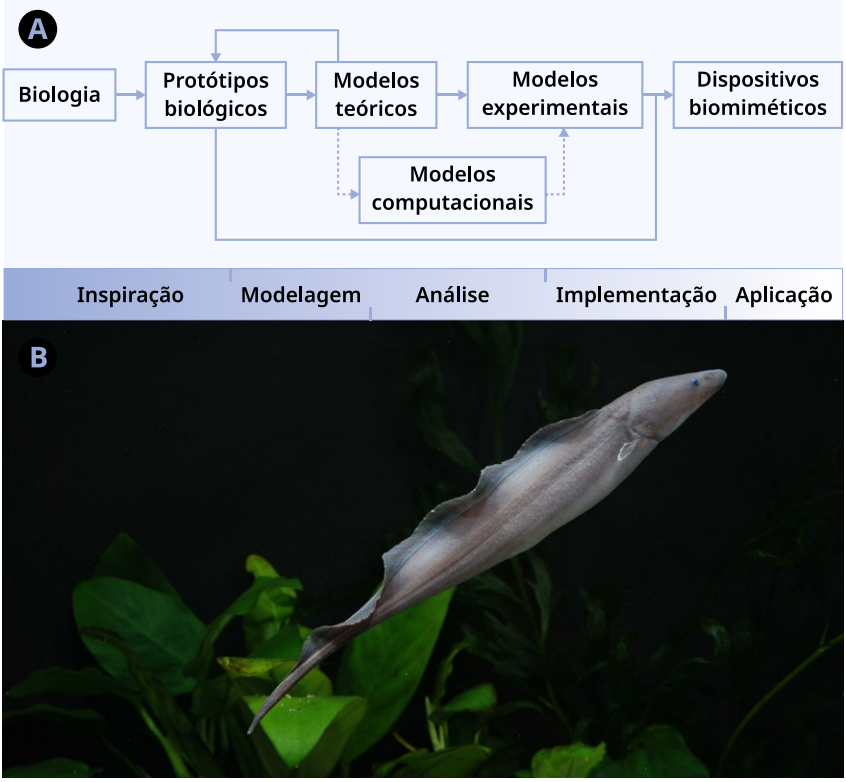


Figura 3: (A) método de projeto bioinspirado seguido por Hu *et al.*; (B) peixe da espécie *Gymnarchus niloticus*

Fonte: Hu *et al.*, (2009, p. 634). Traduzido pela autora.[14]

14 (B) foi licenciada pela autora para o presente trabalho. Disponível em: https://stock.adobe.com/br/images/%E3%82%B8%E3%83%Ao%E3%83%8A%E3%83%BC%E3%82%AB%E3%82%B9/67398469?prev_url=detail.

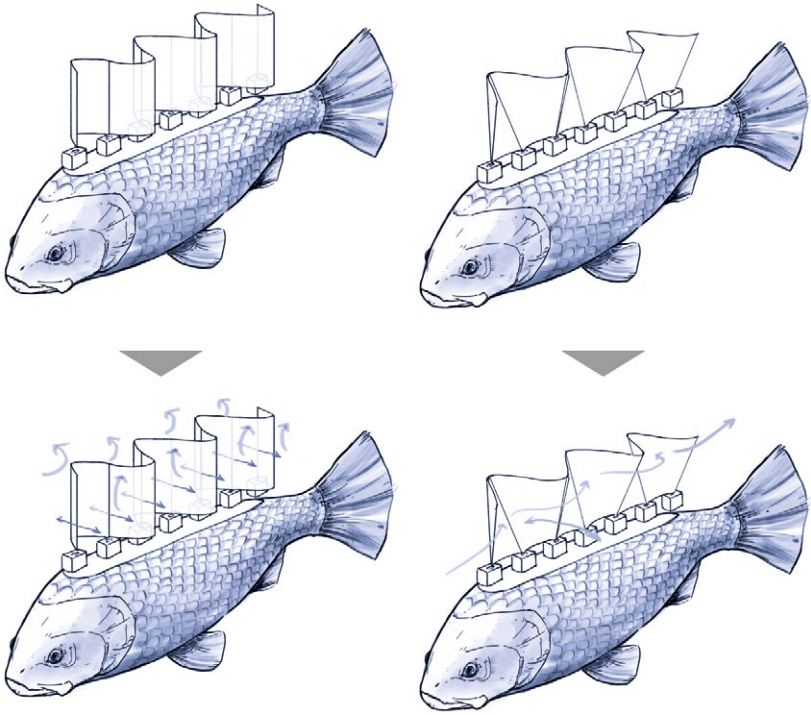


Figura 4: Representação do funcionamento do protótipo proposto por Hu *et al*. (2009) (esquerda) e da nossa proposta de funcionamento da barbatana ondulatória dos peixes de espécie *Gymnarchus niloticus* (direita)

As setas na imagem representam o fluxo de água.

Fonte: elaborado pela autora a partir de ilustração cedida para o presente trabalho.[15]

15 Ilustração de Vinícius de Abreu e Carvalho.

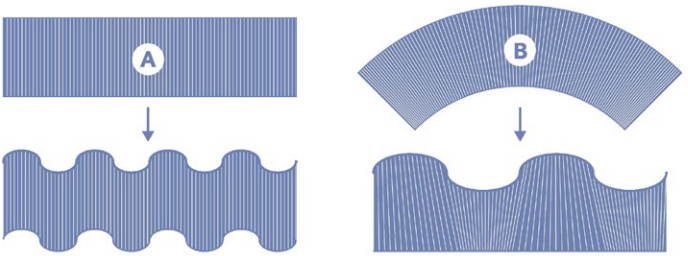


Figura 5: Planificações de membranas

(A) Planificação da membrana plástica usada por Hu *et al.* (2009);
(B) Planificação que resultaria em comportamento semelhante ao das nadadeiras do *Gymnarchus niloticus*.

Fonte: elaborado pela autora.

Os autores se ativeram às questões matemáticas e à construção do protótipo, deixando de notar um detalhe simples, porém crucial para a reprodução do mecanismo: a porção da membrana que se insere no dorso do peixe é mais curta que sua linha superior (semelhante ao corte que faria uma costureira para construir uma saia rodada) (Figura 5). Essa peculiaridade formal altera o comportamento do material e produz um movimento em cadeia nas ondulações do topo da nadadeira, o que provavelmente propicia também economia de energia pelo animal.

1.3 Métodos projetuais e biomimética

Parece evidente que a biomimética permite diferentes abordagens e métodos, sendo crucial, no entanto, que as peculiaridades biológicas ou funcionais sejam compreendidas para que se possa, assim, partir para um passo posterior de replicação.

O pesquisador Werner Nachtigall enfoca o desenvolvimento biônico em uma etapa precursora, em que a figura do "biólogo técnico" é central (podendo, inclusive, atuar de forma independente da etapa projetual). De acordo com o autor, o ponto sensível do processo de pesquisa e desenvolvimento está no olhar do biólogo técnico, que deve ser capaz de observar, julgar e selecionar na natureza exemplos de soluções pelas quais a tecnologia continua procurando.

Desta forma, independentemente do que seria um processo *top-down* ou *bottom-up*, a figura do biólogo técnico parece indispensável, pois é ele o responsável capacitado a encontrar na natureza, com o apoio de conhecimentos prévios, as soluções aplicáveis às demandas ou, na segunda abordagem, em encontrar na natureza questões pertinentes aos desafios tecnológicos atuais.

Outro ponto importante, frisado por Nachtigall, destaca a natureza de qualquer outra fonte de conhecimento: tudo o que existe, funciona (ainda que esta afirmação pareça tautológica). Usando o exemplo da fotossíntese, o autor defende que, do ponto de vista de um engenheiro que não soubesse da realização desse processo pelas folhas de plantas, seria praticamente absurdo considerar a possibilidade de transformar luz e gás carbônico em energia.

Ainda que haja alguma discordância entre os autores em relação às formas de apropriação do conhecimento adquirido na natureza para a concepção de soluções projetuais, parece unânime que a biomimética é de fato capaz de contribuir para a inovação tecnológica ao exibir exemplos e provocações profícuos.

Capítulo 2

Natureza *vs*. tecnologia; Natureza + tecnologia

Neste capítulo serão investigados e comparados os fenômenos e trajetórias da natureza e da tecnologia: como são, como evoluem, o que têm em comum e quais as diferenças entre ambos. Também serão apresentados conceitos gerais concernentes à evolução dos seres vivos e à teoria da evolução, buscando desmistificar a concepção progressista da evolução e a teleologia, tanto na natureza quanto no processo de desenvolvimento tecnológico. Assim, perguntas como "é possível transpor conceitos da biologia para a tecnologia?" e "seriam as espécies extintas fracassos da natureza?" serão discutidas sob a ótica da biomimética.

2.1 Evolução natural, diversidade e variabilidade

A evolução natural, como conceito e teoria científica, refere-se a um processo contínuo e intrínseco à vida orgânica, que proporciona a incrível diversidade morfológica observada no planeta Terra.

O principal responsável pela difusão desse conceito como processo biológico inerente (e inevitável) aos seres vivos foi Charles Darwin, naturalista britânico do século XIX. Seu livro *A Origem das Espécies* (1859) lançou as bases do pensamento evolucionista moderno. Seu antecessor mais conhecido foi Jean-Baptiste de Lamarck, naturalista francês, responsável por uma série de observações corretas a respeito da aquisição de caracteres morfológicos.[16] No entanto, Lamarck é mais lembrado pelo seu principal erro: a Lei de uso e desuso, segundo a qual as características morfológicas apareceriam

16 Caracteres morfológicos referem-se a características físicas ou estruturais de um organismo – como forma, tamanho, cor, entre outras – que podem ser usadas para descrever e classificar os seres vivos.

e desapareceriam de acordo com a necessidade, e que os traços físicos assim adquiridos por uma geração seriam transmitidos (de forma até então desconhecida) para as gerações seguintes. À primeira vista essa ideia parece intuitiva, e é interessante estar atento ao fato de que a população, de forma geral, pensa assim – incluindo o próprio Charles Darwin. "Girafas apresentam pescoços longos para se alimentar das folhas mais tenras no alto das árvores", ou "os macacos se tornaram bípedes para se deslocar de forma mais eficiente no solo, abandonando gradualmente a vida arborícola". Soa científico.

Mas a verdade é que a evolução biológica é a causa e não o efeito da diversidade. O pescoço dos ancestrais das girafas não cresceu para que eles pudessem se alimentar de folhas mais altas. Nasceram ancestrais com pescoços de tamanhos variados, e aqueles de pescoço ligeiramente mais longos que a média da população enfrentavam uma competição menos acirrada por comida, dessa forma, suas chances de sobreviver eram ligeiramente maiores, e, sobrevivendo, conseguiram transmitir para as gerações posteriores a bagagem genética responsável pelo pescoço mais longo. O tamanho de pescoço mais adequado foi selecionado pelo ambiente, e não o contrário. Isso é, de forma sintética, a seleção natural – conceito elaborado concomitantemente por Charles Darwin e Alfred Russel Wallace. Se pescoços crescessem de acordo com a necessidade de se alimentar em fontes cada vez mais altas, haveria animais pescoçudos em outros ambientes. Mas só nas planícies africanas existiam animais com carga genética apta a gerar (e manter) pescoços maiores, uma vez que essa característica exige outras adaptações, como corações mais

potentes, para que o sangue alcance cérebros mais distantes. E a seleção natural, inexorável, continuou selecionando, dentre os pescoços cada vez mais desenvolvidos, os mais alongados. Dentre os ancestrais também nasciam indivíduos com pescoços abaixo da média, mas estes morriam porque enfrentavam uma competição alimentar ferrenha. Ou talvez, com campos de visão menos privilegiados, eles não conseguiam avistar um predador a tempo, tornando-se presas fáceis. Seja qual for a pressão seletiva (alimentação, predação ou ambas), girafas de pescoço curto não vigoraram nesses ambientes.

A evolução biológica atua por mecanismos diversos: o genótipo (bagagem genética) define as características que podem ser manifestar através do fenótipo (conjunto de caracteres físicos, parte herdada, parte adquirida). Gêmeos univitelinos, por exemplo, têm genótipo igual, como clones, mas suas características físicas podem variar em função dos hábitos de vida de cada um e de fatores abióticos do local onde habitam (como temperatura média e incidência solar). O genótipo também sofre alterações aleatórias, as chamadas "mutações", que podem acarretar mudanças fenotípicas. Contudo, o DNA possui estratégias para evitar transformações muito radicais. São justamente essas mudanças que a pressão ambiental seleciona e que serão (ou não) transmitidas para a próxima geração. As mutações não estão, de forma geral, relacionadas com o ambiente, mas podem ser causadas pontualmente por ele, como no caso do câncer de pele, em que mutações no núcleo das células epiteliais podem ser causadas por radiação solar. Alterações e variações no código genético também ocorrem durante a divisão celular, através

da recombinação genética, quando as informações contidas no conjunto genético podem ser "embaralhadas", gerando (ou não) novas combinações de códigos, como anagramas.

Os mecanismos epigenéticos também determinam a expressão ou supressão de caracteres (através da atividade dos genes) sem que o código genético seja alterado. Todas as células do corpo de um indivíduo possuem o mesmo código genético, entretanto, cada órgão, sistema ou tecido (entre outros) tem características próprias e suas células devem ser capazes de se organizar e funcionar de modo específico, produzindo proteínas e outras substâncias apropriadas. São os mecanismos epigenéticos que ativam ou inativam os genes para que isso aconteça. Essa característica é importante, por exemplo, nas fêmeas de mamíferos: a inativação do segundo cromossomo X é necessária para que os produtos desse gene não sejam gerados em dobro.

Mas se, sob uma ótica global, a seleção natural aumenta a diversidade biológica, localmente ela pode agir de forma oposta: mudanças ambientais drásticas podem selecionar, dentre uma população variada, um genótipo específico, eliminando abruptamente todos os outros. Esses eventos são conhecidos como deriva genética, e podem levar populações isoladas à extinção.

A evolução tecnológica, por outro lado, não opera de forma independente dos organismos e surge exatamente das atividades intelectuais e práticas, das quais depende fundamentalmente para se desenvolver.

2.2 Tecnologia e evolução tecnológica: uma breve introdução

Identificar o percurso da evolução tecnológica é relativamente simples, principalmente por sua ligação intrínseca com a evolução humana e com os avanços históricos da humanidade. Entretanto, definir com exatidão o conceito de tecnologia é uma dificuldade compartilhada por diversos autores (Basalla, 2002; Aunger, 2009; 2010). A palavra "tecnologia" vem do idioma grego e se originou a partir da fusão dos termos *téchnē* – que pode significar "arte", "habilidade" e "artesanato" – com *logía* – que significa "o estudo de". Mas a busca pelo significado desse termo resulta em uma diversidade de definições. Mitcham (1994) define a tecnologia como "a construção e o uso de artefatos", enquanto Aunger (2010) traz uma definição mais ampla, organizando a tecnologia em três categorias:

- **Conhecimento** – técnica (o *know-how* especializado para inventar e construir artefatos);
- **Atividade** – a técnica aplicada na prática para a produção de artefatos;
- **Produto** – artefatos (produtos da atividade).

Uma definição bastante abrangente pode ser encontrada na enciclopédia colaborativa Wikipédia:

> Tecnologia é a construção, modificação, uso e conhecimento de ferramentas, máquinas técnicas, artesanatos, sistemas e métodos de organização a fim de solucionar um problema, melhorar uma solução já existente, atingir um objetivo, lidar com uma determinada relação entrada/saída, ou para exercer uma função específica.

> Também pode se referir ao conjunto de tais ferramentas, maquinário, modificações, arranjos e procedimentos. As tecnologias afetam significativamente a habilidade do homem, bem como de outros animais, de controlar e se adaptar ao seu ambiente natural (Wikipédia, 2015).

No senso comum é recorrente que se defina tecnologia como uma aplicação da ciência na prática. Seu surgimento, contudo, é muito anterior à concepção moderna de ciência, operando de forma totalmente independente do chamado método científico. A tecnologia, é importante frisar, foi o principal fator a diferenciar os primeiros hominídeos de outros ancestrais que temos em comum com os chimpanzés e gorilas, cerca de 4 milhões de anos atrás (Ambrose, 2001).

Alguns autores defendem que a tecnologia seria um fenômeno exclusivamente humano, de forma que o termo não seria aplicável aos artefatos criados e/ou utilizados por animais em função de sua rudimentaridade, sobretudo quando comparados aos produzidos pelas culturas humanas. Alguns autores admitem manifestações como a produção de ferramentas por chimpanzés ou artefatos criados com galhos pelos neandertais apenas como indícios da origem da tecnologia (Basalla, 2002; Aunger, 2010). Por outro lado, outros autores, como McGhee (2011), combatem a ideia da tecnologia como fenômeno que diferenciaria os humanos (ou, pelo menos, os primatas) do restante da natureza, apresentando o corvo-da-nova-caledônia e outras dez espécies capazes de produzir e utilizar como ferramentas artefatos encontrados na natureza. No trabalho também é discutida a abordagem conceitual para a classificação de "ferramentas", pontuando que algumas construções animais

apresentam alta eficiência e, por conseguinte, considerável refinamento "projetual". Esses e outros comportamentos são tratados por Hansell (2005, 2007) como uma arquitetura animal (*animal architecture*). Entre os exemplos apresentados pelo autor destaca-se a construção de ninhos por pássaros através de cinco diferentes e eficientes técnicas, sendo elas: empilhamento; emaranhamento; "fixação-velcro"; costura; e tecelagem. Outro bom exemplo é o do molusco marinho *Amphioctopus marginatus*, conhecido como polvo do coco, que ganhou esse nome popular em função de seu comportamento "arquitetônico": conchas e cascas de coco dispersas no mar são apropriadas pelos indivíduos desta espécie para a construção de abrigos. Vespas e marimbondos também se mostram exímios construtores, utilizando duas técnicas principais para a construção de suas colônias: adobe e papel.

McGhee (2011) acrescenta à discussão exemplos de cupins que também exibem uma distinta técnica na construção de suas habitações, o que é especialmente notório na espécie australiana *Amitermes meridionalis*. Os indivíduos dessa espécie, conhecidos como cupim-bússola, constroem cupinzeiros de seção alongada, cujo eixo maior é sempre orientado na direção norte-sul. Assim, independentemente da hora do dia, a construção recebe sol em apenas um dos lados, o que ocasiona um fluxo constante de ar, que vai da face sombreada para a face iluminada. Por fim, cabe citar o exemplo bastante conhecido dos castores, que utilizam galhos, toras de madeira, pedras e adobe (barro e argila) para a construção de seus alojamentos, cujas entradas subaquáticas levam a estruturas flutuantes em forma de domo, bastante eficientes para protegê-los dos predadores (McGhee, 2011). Indo um

pouco além da construção de abrigos, o que chama atenção nesses roedores é a criação de represas artificiais através da construção de diques. Essas barragens construídas por castores alcançam em média 450 metros de comprimento e, em 2009, no Parque Nacional Wood Buffalo (Canadá), foi descoberta a maior encontrada até hoje, que com 850 metros pode ser vista do espaço. Estima-se que a construção do dique seja resultado do esforço conjunto de várias famílias de castores ao longo de vários meses. Portanto, pode-se refletir não somente sobre a capacidade construtiva individual, mas também sobre esforços colaborativos em outras espécies além da humana.

Outro ponto de discordância na definição de tecnologia é se ela está necessariamente ligada à criação ou à aplicação de artefatos materiais, pois essa conceituação excluiria fenômenos como os de organização social e política e de posições ideológicas, relacionadas, por exemplo, à "ética da tecnologia" (Mitcham, 1994; Aunger, 2009; 2010).

Embora cercado de tanta discussão, parece relativamente seguro afirmar que o fenômeno da tecnologia é bastante pronunciado na espécie humana, sendo ou não manifestado de maneira rudimentar em outras espécies, podendo ser fruto tanto da necessidade quanto da pura inventividade. Também pode-se descrevê-lo, considerando exclusivamente o gênero *Homo*, como um processo cumulativo – que representa um progresso evolutivo ascendente ao longo do tempo – em repertório e em manifestações culturais e sociais.

2.3 Natureza x tecnologia: variação, invenção e mutação

Frequentemente é aplicado um olhar funcionalista para fazer referências às estruturas encontradas na natureza. Com isso, elas acabam sendo estudadas e compreendidas a partir das funções que exercem, como se tivessem sido projetadas com tal propósito. Essa abordagem é, provavelmente, fruto da relação intrínseca entre o homem, a tecnologia e seu espaço, o "mundo dos artefatos fabricados", em oposição ao restante da natureza. Assim, dificilmente pensamos na biologia sem pensar em termos antropomórficos (Popper, 2002). Abordando as estruturas naturais a partir de sua função, tendemos a falar, por exemplo, "do objetivo das placas do estegossauro" e "da função do olho ou da mão", ou "que o tentilhão [pássaro] tem um forte bico curto e grosso, a fim de quebrar nozes" (Ruse, 2004, p. 7), revelando uma a influência e a herança da Lei de uso e desuso do pensamento lamarckiano, o que é denominado por Ruse (2004) *"function-talk"* (descrição por função). Seguindo essa lógica, quando olhamos a natureza, obtemos a imagem de um universo "inventivo ou até criativo, no qual emergem coisas novas em novos níveis" (Popper, 2010, p. 236), mas que é tão somente o resultado de milhares de anos de evolução em que mutações aleatórias e pressões seletivas geraram estruturas que parecem ter sido intencionalmente projetadas. Perutz (2003) ressalta os diferentes trajetos percorridos pelos artefatos e produtos, frutos da intencionalidade exercida através de um projeto prévio e dos seres vivos:

> [...] os artefatos criados pelo homem são deliberadamente projetados, enquanto as estruturas da natureza

> evoluíram a esmo, ao longo de milhões de anos através da recombinação de genes, da mutação e da seleção natural de características, o que resultou em descendentes mais bem preparados (Perutz, 2003, p. 229).

A evolução biológica não tem, portanto, compromisso com a função ou utilidade das estruturas geradas. É justamente o ambiente que cria as restrições que colocarão o funcionamento desses recursos à prova, permitindo aos seres mais adaptados ao meio gerar mais descendentes e se perpetuar.

É necessário pontuar, no entanto, que a evolução biológica opera de modo lento e gradual. Não existem saltos abruptos na evolução – as mutações muito radicais em geral não são toleradas pelo ambiente ou pela própria espécie (corre-se o risco, por exemplo, de que esse novo indivíduo seja incapaz de gerar descendentes férteis com outros membros de seu grupo). Ao longo do processo de seleção natural, perpetuam-se as melhores soluções encontradas em uma determinada linha; as mudanças são sempre pequenas e incrementais.

Marcus (2008) utiliza a alegoria de uma cadeia de montanhas (Figura 6) para representar diferentes soluções incrementais da natureza que culminaram na criação de estruturas eventualmente análogas (com função semelhante), mas que se originaram e evoluíram independentemente umas das outras. Dadas as sucessivas mutações submetidas à pressão seletiva ao longo do tempo, cada classe de solução se dirigiria autonomamente em direção ao cume de uma montanha (que representa a máxima eficiência possível, alcançada mediante um processo cumulativo operado pela seleção natural).

Desse modo, seria inviável passar de uma montanha a outra: para fazer isso, o indivíduo teria de andar na contramão da evolução – regredindo em uma solução já desenvolvida e selecionada naturalmente para que a espécie encontrasse uma solução diferente que a permitisse evoluir em direção ao topo de uma nova montanha.

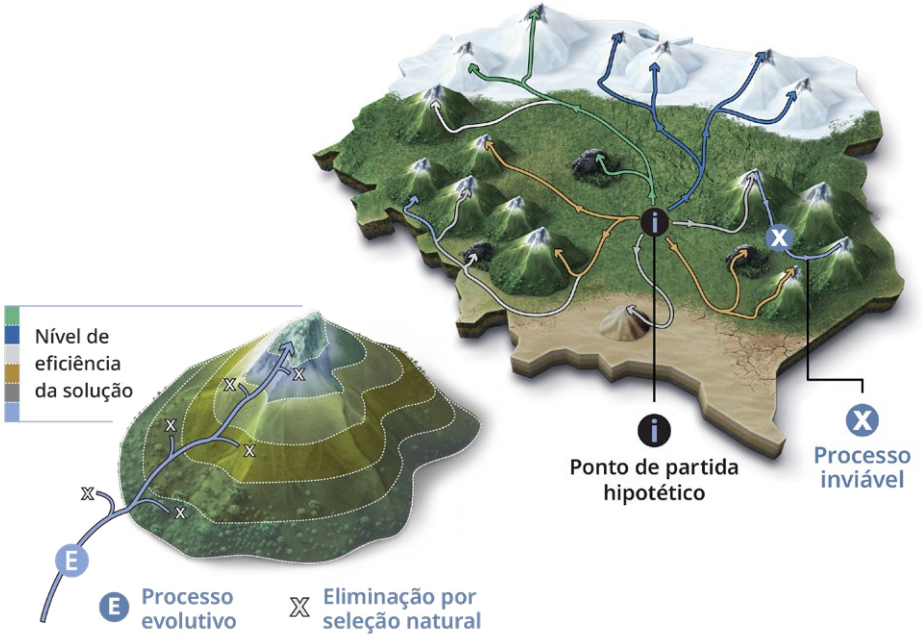


Figura 6: Soluções incrementais no processo evolutivo: representação da alegoria da cadeia de montanhas proposta por Marcus (2008)

Fonte: elaborado pela autora.

Não se pode afirmar que as soluções existentes são necessariamente as melhores possíveis do ponto de vista conceitual

ou mecânico; é preciso considerar a aptidão genética das espécies e indivíduos para o desenvolvimento de uma ou de outra estrutura. Conforme exemplificado pelo autor, os seres humanos mantiveram a coluna vertebral – uma solução longe da ideal para nos manter de pé – não por ser a melhor dentro de todas as possibilidades mecânicas, mas por termos evoluído a partir de quadrúpedes que possuíam essa estrutura. Nas condições de pressão seletiva existentes no ambiente, andar de pé, mesmo que com sacrifício para a coluna, era melhor do que não fazê-lo e continuar a se locomover apoiando-se em quatro membros.

Essas e outras estruturas encontradas na natureza (como o cérebro humano) são definidas por Marcus como *kluge*, termo utilizado por engenheiros para designar uma desajeitada ou deselegante mas surpreendentemente efetiva solução para um problema – o que em português denominaríamos "gambiarra". Os *kluges* seriam criados por engenheiros com o principal propósito de economizar tempo ou dinheiro. O processo evolutivo, contudo, não sendo fruto de pensamento racional, não leva em conta tempo ou o dinheiro – e ainda assim observamos uma série de *kluges* nas construções da natureza. Outro exemplo de "gambiarra biológica" é a anatomia do olho humano: a retina fica no fundo do globo ocular, sendo afetada por tudo o que passa entre ela e a córnea; inclusive por um conjunto de nervos ópticos, que dão aos olhos humanos alguns pontos cegos. De acordo com Marcus (2008), a explicação é simples: a natureza é propensa a fazer gambiarras porque ela não "se importa" se seus produtos são perfeitos ou elegantes. Quando algo funciona, se perpetua; quando não funciona, desaparece. Genes que produzem

soluções de sucesso tendem a se propagar; genes que resultam em criaturas inaptas tendem a ir desaparecendo; todo o resto é metáfora. "Adequação", não "beleza", é o nome do jogo.

Esse conceito é semelhante ao de *Adaptive Landscape*[17] (Panoramas Adaptativos), abordado por McGhee em *The Geometry of Evolution* (A Geometria da Evolução) e proposto originalmente por Sewall Wright. Ao modelar o mesmo cenário, McGhee (2006) classifica o salto de um topo ao outro como "menos provável", e não "impossível", descrevendo que seria mais provável que indivíduos saltem (morfologicamente falando) entre picos de pequenas montanhas do que entre picos de grandes e altas montanhas. McGhee pontua que grandes saltos acarretariam mudanças morfológicas radicais, o que provavelmente criaria combinações deletérias.

O processo evolutivo é cumulativo, perpetuando e aprimorando soluções para os mais variados desafios simultaneamente. Lembremos que a diversidade biológica que observamos hoje é o resultado dos processos de um percurso estimado em 3,5 bilhões de anos.

2.4 Hibridação

Sabemos que a natureza possui uma enorme diversidade de espécies, mais ou menos complexas e com variadas soluções funcionais testadas ao longo de um processo contínuo de erro e tentativa via pressão seletiva. Assim, como resultado,

17 Este conceito será detalhado no capítulo "Divergência, convergência e as limitações do design bioinspirado".

temos espécies raramente capazes de se reproduzirem umas com as outras, confirmando um longo processo de especiação.[18] Por isso, a hibridação – cruzamento entre indivíduos de espécies diferentes – raramente gera prole e, menos frequentemente ainda, resulta em indivíduos férteis.

No campo tecnológico, entretanto, a combinação de artefatos e técnicas diferentes com frequência origina novas e férteis tecnologias – capazes de gerar outras inovações. A Figura 7 foi criada pelo antropólogo Alfred L. Kroeber para comparar a evolução biológica com o desenvolvimento cultural humano e foi aplicada por George Basalla (2002) para contrapor as evoluções naturais e tecnológicas.

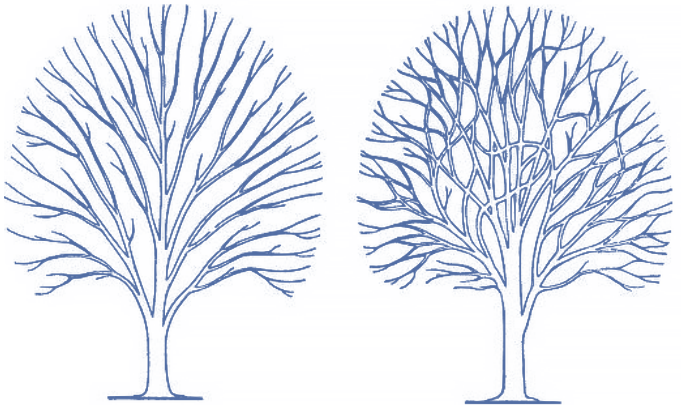


Figura 7: Evolução natural *versus* evolução tecnológica

À esquerda, a evolução biológica. À direita, o desenvolvimento cultural humano.

Fonte: Kroeber (1923, p. 260).

18 Especiação é o processo impulsionado por mutações genéticas e pressões seletivas em que populações se diferenciam gradualmente, originando novas espécies com características distintas.

Em função da capacidade de hibridação, o fenômeno tecnológico tem percorrido uma trajetória hiperbólica ascendente desde o período Paleolítico, há cerca de 2,5 milhões de anos, com uma expressividade ligeiramente maior a partir da evolução do *Homo sapiens*, há aproximadamente 50 mil anos. O desenvolvimento tecnológico intensificou-se na Idade Moderna, sobretudo a partir da primeira Revolução Industrial, e na Idade Contemporânea, principalmente com a segunda e a terceira Revoluções Industriais (esta última também chamada de "Revolução Digital"). Entretanto, toda a trajetória do ser humano moderno representa cerca de 0,03% (200 mil anos) do percurso da vida multicelular na Terra e, se considerarmos apenas a presença do *Homo sapiens*, esse percentual cai para 0,0008%.

Ainda que a pluralidade tecnológica tenha atingido um índice espantosamente alto, ela é fruto de uma presença relativamente curta do homem na Terra e está restrita a um método projetual (tecnológico) que opera através da criatividade humana. A natureza, por outro lado, gerou ao longo de quase 4 bilhões de anos uma quantidade aproximada de 8,7 milhões de espécies a partir de simples organismos unicelulares, as primeiras formas de vida existentes (Figura 8). Nesse percurso, um número muito maior de espécies foi colocado à prova por diversos fatores, resultando em registros fósseis de seres já extintos em nossa fauna terrestre atual.

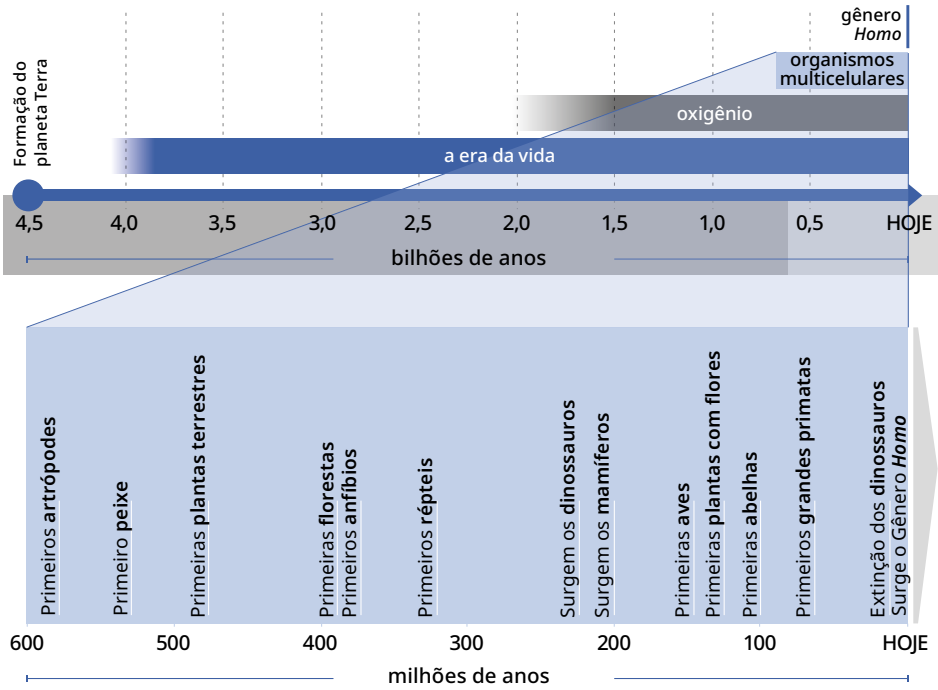


Figura 8: Linha do tempo da vida na Terra

Acima: linha do tempo do planeta Terra; a vida surgiu há mais de 4 bilhões de anos, enquanto os homens anatomicamente modernos surgiram há cerca de 200 mil anos.

Abaixo: linha do tempo desde o surgimento dos organismos multicelulares até os dias de hoje; a presença do gênero *Homo* se deu em apenas 0,03% deste percurso.

Fonte: elaborado pela autora.

2.5 Acumulação e repertório

Durante o processo evolutivo é possível que as espécies percam uma ou outra característica que carregavam em seu código genético. A partir desse ponto, somente se

perpetuarão as características que permaneceram em seu genótipo. Dessa forma, mesmo tendo evoluído a partir de hominídeos *Australopithecus*, seria impossível que nossa espécie gerasse, hoje, um exemplar desse gênero, pois diversas características se perderam durante o percurso evolutivo do gênero *Homo* até o *Homo sapiens*, e outras surgiram. Assim, as características genéticas são indissociáveis dos indivíduos e grupos e somente através deles podem se perpetuar.

Em contraponto, a perpetuação das tecnologias pode se dar através de formas como a linguagem oral e escrita, a cultura e o comportamento dos indivíduos. Ou seja, é possível que sejam aprendidas ou resgatadas quando se faz necessário.

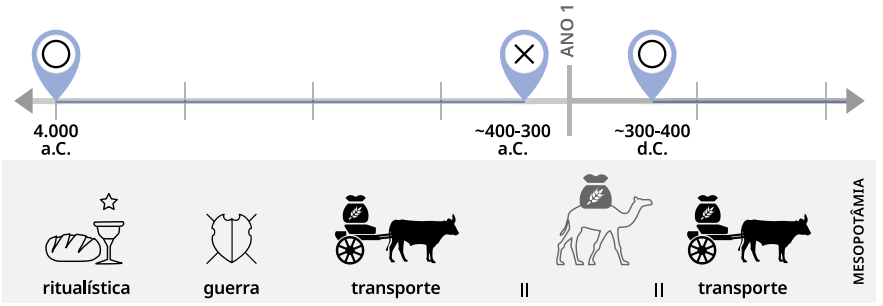


Figura 9: Linha do tempo de invenção e uso da roda na Mesopotâmia

Fonte: elaborado pela autora.

A roda, por exemplo, tida pela cultura ocidental como uma das principais e mais importantes invenções do homem e um dos principais indicadores de progresso tecnológico na concepção das civilizações ocidentais, passou por ciclos de uso e desuso (Figura 9). Indícios arqueológicos apontam

para a invenção da roda por volta do quarto milênio a.C. na Mesopotâmia, região localizada entre os rios Tigre e Eufrates, e em pouco tempo a tecnologia se difundiu até o noroeste da Europa. Em um primeiro momento, os veículos com rodas foram utilizados com fins ritualísticos e, posteriormente, em guerras, para só então adquirir a função de transporte de suprimentos. Entre o terceiro e o sétimo século a.C., no entanto, as civilizações do norte, oriente médio e oriente da África substituíram o transporte feito por veículos com rodas por camelos, considerados mais eficientes que carroças e charretes no transporte de carga. Esses animais eram capazes de carregar mais peso, se locomover mais depressa e ir mais longe com uma quantidade menor de água e comida quando comparados aos animais tradicionalmente utilizados, como os bois. Ainda em comparação aos veículos de carga com rodas, os camelos não demandavam a construção de estradas ou pontes. Com isso, o uso dos camelos perdurou por cerca de mil anos, até que a roda voltou a ser utilizada (Basalla, 2002).

2.6 Evolução, progresso e o mito da teleologia

Segundo a corrente funcionalista da antropologia (abordagem adotada no senso comum), a tecnologia, assim como traços culturais e comportamentais, teria a função de responder a uma necessidade do ser humano. Esses argumentos são combatidos por Basalla (2002), que afirma que até mesmo invenções como a roda e os veículos automotores não foram criadas para satisfazer a demanda de transporte, ganhando essa função apenas alguns séculos depois. Do mesmo modo, a agricultura e a arquitetura não resultaram das necessidades

biológicas de nutrição e abrigo, mas encontraram sentido posteriormente à sua invenção. A invenção do fonógrafo por Thomas Edison em 1877 é outro exemplo notável. Ao divulgar sua invenção, Edison escreveu um artigo propondo dez usos para o fonógrafo, que incluíam: preservar as últimas palavras de pessoas que estavam próximas de morrer; gravar livros em áudio para cegos; e ensinar como soletrar. A reprodução musical figurava apenas em quarto lugar da lista de prioridades do inventor; registra-se também que anos depois Edison teria dito ao seu assistente que a invenção não tinha valor comercial (Diamond, 1998).

O curso das invenções e descobertas tecnológicas não é, portanto, necessariamente teleológico – "orientado por finalidades". De modo semelhante, com frequência é aplicada a expressão "tentativa e erro" para se referir às evoluções adaptativas surgidas na natureza, inclusive por autores da área de biomimética como Bar-Cohen (2005, 2012). Essa interpretação da evolução das espécies também foi aplicada pelo filósofo Karl Popper no livro *Objective Knowledge* (Conhecimento Objetivo, em tradução livre) (1972), na ocasião em que se retratava após atacar a teoria darwinista. No entanto, "tentativa e erro" denota intencionalidade e, consequentemente, a presença de uma entidade racional (explicitada pela presença de um objetivo) representada pela natureza. Se aplicável, a forma mais aproximada do considerado correto sob o ponto de vista da teoria darwinista seria entendendo "erro" como algo que escapa a um padrão[19] e "tentativa" como a verificação prática de uma matriz finita de possibilidades: sobreviver ou não; perpetuar seu genoma ou não.

19 Nesse caso, o "padrão" morfológico, mental ou gênico de um indivíduo.

2.7 Diversidade, variabilidade e evolução natural

As mutações, a variabilidade genética (provida pela reprodução sexuada) e os fenômenos epigenéticos deram origem a uma incrível diversidade de espécies – vivas ou já extintas. Cada pequena alteração orgânica, mesmo que a nível molecular, é capaz de alterar significativamente o desempenho individual de cada ser vivo, dando-lhe ligeira vantagem (ou desvantagem) e permitindo (ou não) que enfrente os desafios ambientais propostos até que seja capaz de se reproduzir.[20] Esse fenômeno, embora pareça pouco relevante a curto prazo, é capaz de cumulativamente propiciar grandes e sensíveis mudanças no panorama das espécies.

É crucial, no entanto, analisar outro componente desse cenário: além de seres vivos em constante mudança, as transformações geológicas, ambientais e ecológicas deram origem a constantes e mutáveis desafios ambientais. Quando se trata de "sobrevivência dos mais aptos", portanto, a aptidão deve ser avaliada em função do contexto ambiental, ecológico e geológico em questão.

Diversos seres já extintos poderiam encontrar algum sucesso no presente, tal como espécies invasoras se adaptam em outros habitats que não o seu natural. O processo de evolução biológica não deve então ser tomado como um caminho em direção ao progresso.[21] O caráter cumulativo do processo evolutivo é capaz de gerar estruturas mais complexas, mas no que se refere ao preparo em relação às pressões seletivas,

20 Este é resumidamente o conceito de sobrevivência evolucionária.

21 Ao menos as evidências científicas não apoiam essa afirmação.

a simples continuidade da existência de bactérias e algas nos dias atuais evidencia a não relação entre complexidade e aptidão. Logo, seres já extintos podem exibir sistemas e soluções consistentes para problemas projetuais, pois em algum momento geológico foram capazes de existir e se perpetuar.

Finalmente, pode-se levantar a última questão: além dos fatores bióticos, quais variáveis e limitações permeiam os projetos da natureza?

Capítulo 3

Divergência, convergência e as limitações do design bioinspirado

Neste capítulo, serão exploradas e debatidas algumas questões cruciais relacionadas à biomimética. Em primeiro lugar, examinaremos as limitações que essa abordagem enfrenta, reconhecendo que, embora seja uma fonte rica de inspiração, a biomimética também possui suas próprias restrições e desafios. Em seguida, analisaremos as diversas limitações conceituais, materiais, físicas e de desenvolvimento que influenciam a evolução dos organismos vivos, reconhecendo que a natureza, apesar de suas inúmeras soluções eficientes, não é uma fonte ilimitada de inspiração. Por fim, discutiremos as observações essenciais que devem nortear os projetos bioinspirados, destacando a importância de uma compreensão profunda dos princípios biológicos subjacentes e a necessidade de adaptar esses conceitos à aplicação prática, considerando as demandas específicas do projeto em questão.

3.1 Biomecânica e o impacto do tamanho dos seres vivos

Na natureza, o tamanho das estruturas impacta de forma direta a performance e suas características, mas afeta, principal e intrinsecamente, a sua viabilidade mecânica.

A perda de calor pelos animais é proporcional à área da sua superfície, sendo sua produção de calor proporcional à sua massa total. Devido ao seu alto requerimento metabólico, pequenos beija-flores, morcegos e mamíferos têm que consumir diariamente uma enorme quantidade de alimento. Alguns beija-flores, por exemplo, chegam a consumir oito vezes o seu próprio peso em alimentos, diariamente – o

que seria o equivalente a uma pessoa de 75 kg consumir 600 kg de comida em um só dia! Em função da alta taxa de perda de temperatura, não existem pequenos mamíferos no mar – sobretudo nas águas frias dos oceanos. A Figura 10 mostra pequenos representantes de aves e mamíferos que são exceções entre os outros indivíduos de suas classes. Pode-se observar que todos eles são endêmicos de regiões equatoriais e tropicais do planeta.

Figura 10: Distribuição geográfica de representantes de aves e mamíferos considerados exceções entre outros indivíduos de suas classes

(A) Colibri-abelha-cubano (*Mellisuga helenae*), espécie endêmica de Cuba e da Isla de la Juventud; (B) Sagui-leãozinho (*Cebuella pygmaea*), a menor espécie de símio conhecida, endêmico da floresta equatorial amazônica do Brasil, Colômbia e Equador; (C) Musaranho-pigmeu (*Suncus etruscus*), menor mamífero conhecido e presente na região mediterrânea e no sul da Ásia; (D) Morcego-nariz-de-porco-de-kitti (*Craseonycteris thonglongyai*), espécie endêmica da Tailândia e de Mianmar.

Fonte: elaborado pela autora.[22]

22 (A), (B) e (D) foram licenciadas pela autora para o presente trabalho. Disponíveis em: https://www.alamy.com/stock-photo-bee-hummingbird-mellisuga-helenae-the-smallest-bird-in-the-world-137831118.html; https://www.alamy.com/stock-photo-pygmy-marmoset-climbing-a-branch-17373183.html. https://merlintuttle.smugmug.com/HighQuality/Thailand-2019-MTBC-Field-Workshop/i-qp42pwq/A. **(C)** se encontra sob domínio público. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crocidura_leucodon-1.jpg.

Frequentemente discute-se a capacidade extraordinária das pulgas em pularem cem ou duzentas vezes seu próprio tamanho. Sendo a massa desse animal praticamente desprezível, não se pode compará-lo a outras espécies. Já o salto médio de homens, grilos, gafanhotos e besouros pode ser comparado e relacionado ao peso de cada um (Figura 11), uma vez que se equiparam em capacidade de impulso, de acordo com as análises de Kulfan e Colozza (2012).

Mais do que apenas influenciar a capacidade e a performance em relação às atividades de cada indivíduo, o tamanho das estruturas na natureza está intrinsecamente ligado à sua viabilidade. Baleias, por exemplo, são várias vezes maiores que qualquer mamífero terrestre porque não precisam suportar seu próprio peso, sendo mantidas com o auxílio do empuxo da água. Conforme mostrado por Kulfan e Colozza (2012) (Figura 11), os casos encontrados na natureza demonstram que os padrões de proporção nos seres vivos são pautados pela similaridade elástica, e não pela similaridade geométrica. A questão já havia sido descrita por Galileu Galilei no século XVII, e é explicada de forma detalhada por Timoshenko (1983):

> Você pode ver claramente a impossibilidade de aumentar o tamanho de estruturas a grandes dimensões, quer na arte ou na natureza. Do mesmo modo é impossível construir navios, palácios, ou templos de enorme tamanho, de tal forma que os seus remos, pátios, vigas, parafusos e todas as suas outras partes se mantenham na mesma proporção; nem pode a natureza produzir árvores de tamanho extraordinário porque os ramos quebrariam sob seu próprio peso. Assim também seria impossível reconstruir as estruturas ósseas de homens, cavalos ou de outros animais de modo a desempenhar

> as suas funções normais se estes animais forem aumentados enormemente em altura. Esse aumento em altura poderia ser realizado apenas através do emprego de um material mais duro e mais forte do que o material real, ou pelo alargamento do tamanho dos ossos, alterando assim a sua forma até que a forma e aparência dos animais sugiram uma aberração... se o tamanho do corpo é diminuído, a força do corpo não diminui na mesma proporção; na verdade, quanto menor for o corpo maior é a sua resistência relativa. Assim, um pequeno cachorro provavelmente poderia levar em suas costas dois ou três cães de seu próprio tamanho, mas eu acredito que um cavalo não poderia levar nem mesmo um do seu próprio tamanho (Timoshenko, 1983, p. 13-14).

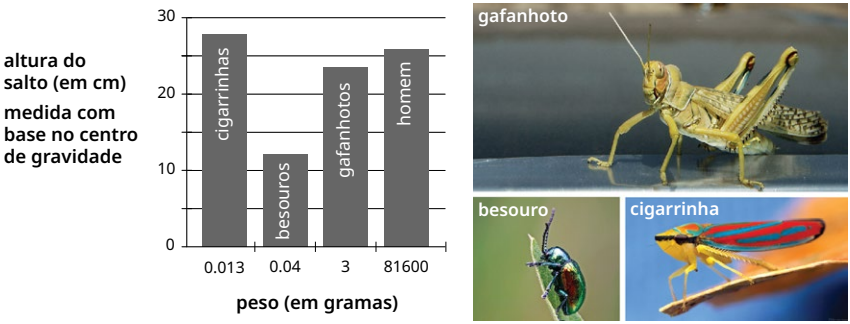


Figura 11: Comparativo entre altura do salto entre espécies de artrópodes e o homem

Fonte: elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza (2012, p. 587).[23]

Retomando as observações de Galileu, o famoso geneticista J.B.S. Haldane publicou, em 1926, o ensaio *On Being the Right Size* (Sobre ser do tamanho certo), em que o autor pontua que cada animal possui o tamanho conveniente, tendo em vista

23 Imagens sob licença Creative Commons. Disponíveis em: https://www.flickr.com/photos/44124425616@N01/1286253471; https://www.flickr.com/photos/126987422@N05/14902480549; https://www.flickr.com/photos/126987422@N05/20826254391.

as questões físicas e biomecânicas – uma grande mudança no tamanho do animal acarretaria também uma mudança de forma: uma lebre não poderia ser tão grande quanto um hipopótamo, assim como uma baleia não poderia ser do tamanho de um peixe. Perutz (2003) ilustra a questão com o exemplo do livro *As Viagens de Gulliver*, em que um ser humano médio encontraria pequenas criaturas com a exata proporção dos seres humanos e, em seguida, gigantes, também com as mesmas proporções – ambos inviáveis nas condições normais do nosso planeta. Os gigantes de Brobdingnag, que mediam 30 metros de altura, pesariam 280 toneladas, 4.600 vezes mais que Gulliver, mas, uma vez que seus ossos seriam apenas 300 vezes mais grossos, eles teriam desmoronado sob seu próprio peso. Os liliputianos descritos em *As Viagens de Gulliver*, por outro lado, mediam apenas 15 centímetros. Nas condições físicas da Terra, eles se beneficiariam de serem capazes de cair de alturas grandes sem se machucarem, porque o arraste reduziria a velocidade de sua queda mais do que em um homem de tamanho normal – uma proporção ainda maior entre área de superfície em razão do peso permite que ratos caiam em buracos de minas e corram prontamente, intactos. Por outro lado, sua demanda energética seria tal como a de um pequeno roedor e os liliputianos passariam boa parte de seu tempo se alimentando para serem capazes de manter sua temperatura corporal (Figura 12).

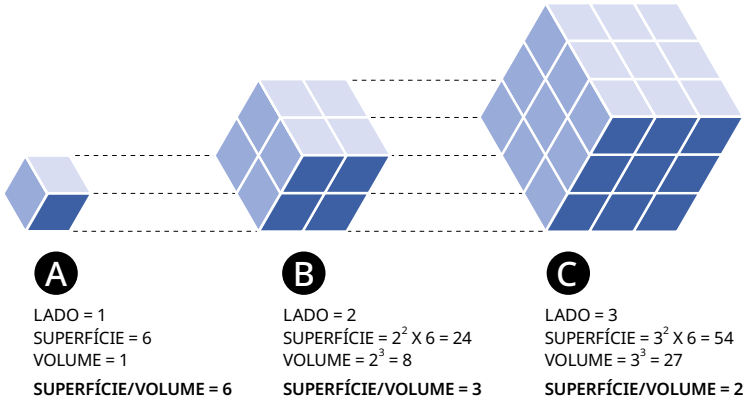


Figura 12: Relação entre massa e volume em sólidos

Fonte: elaborado pela autora a partir de Kardong (2012, p. 132).

As questões pontuadas se devem a um importante fundamento que permeia os "projetos" da natureza, o de similaridade elástica. Esse conceito, elaborado por McMahon em 1973, determina que animais de diferentes tamanhos devem ser "elasticamente semelhantes", ao invés de geometricamente semelhantes (Figura 13). Assim, assume-se que a natureza otimiza seus designs quando se trata da escala e que animais, independentemente do seu tamanho, têm uma probabilidade similar de falha elástica nas estruturas que os suportam. Ou seja, à medida que aumenta o tamanho dos seres vivos, as relações de proporção corporais se modificam para que a sua estrutura se torne fisicamente viável (Perutz, 2003).

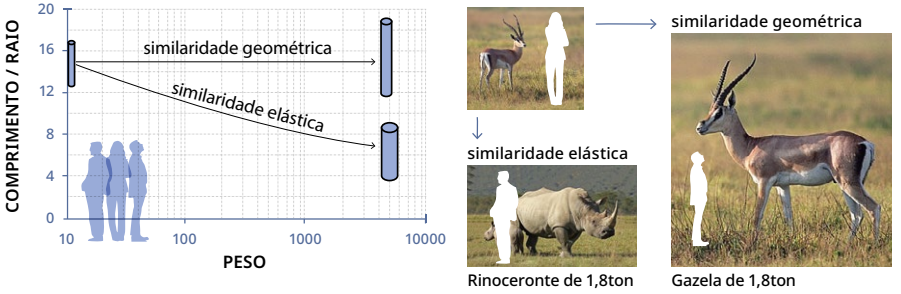


Figura 13: Similaridade elástica *versus* similaridade geométrica

Fonte: elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza (2012, p. 594).[24]

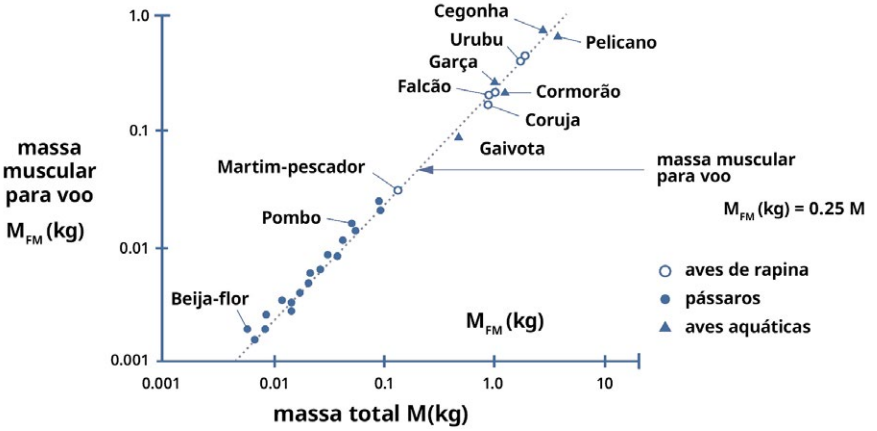


Figura 14: Proporção entre massa muscular para voo e massa muscular total em aves

Fonte: elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza (2012, p. 592).

Quando se trata especificamente do voo de aves, essas demandas de viabilidade também ficam evidentes. Há, por

24 As imagens utilizadas foram geradas por ferramenta de inteligência artificial (DALL-E) e editadas pela autora.

exemplo, uma forte correlação entre a massa muscular para voo e a massa total na maioria dos pássaros, conforme demonstrado por Kulfan e Colozza (2012) (Figura 14). Além da constituição física, as estratégias comportamentais das espécies enquanto voam também são essenciais para a viabilidade técnica do voo, como a formação em "V" adotada por aves migratórias, capaz de beneficiar todo o conjunto com a economia energética (Figura 15).

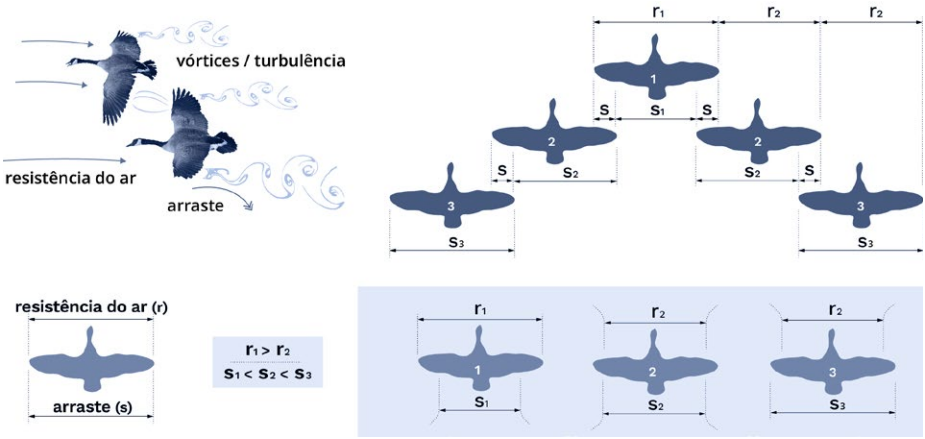


Figura 15: Redução da resistência do ar e arraste na formação em "V"

Na formação em "V" todos os indivíduos se beneficiam: o primeiro é beneficiado pela redução do arraste, os últimos pela redução de resistência do ar e os demais são beneficiados por ambos.

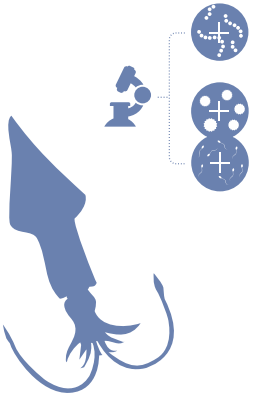
Fonte: elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza (2012, p. 609).

Deve-se observar, contudo, que os métodos adotados por diferentes espécies no voo (ou nado) guardam especificidades. Um fato interessante relatado por Kulfan e Colozza (2012) mostra que, se feitos os cálculos de aerodinâmica

(envolvendo peso, volume e área das asas), seria possível provar matematicamente que as abelhas terrestres *Bumblebee*, naturais da Austrália, seriam incapazes de voar. No entanto, independentemente dos cálculos biomecânicos, os indivíduos dessa espécie são capazes de fazê-lo. Tal fato intrigante foi explicado por pesquisas recentes, que demonstraram que as *Bumblebee* produzem a propulsão necessária para voar a partir de movimentos complexos de asas que criam vórtices que as mantêm suspensas no ar (Sun, 2005; Miller, 2004; Bomphrey*;* Taulor; Adrian, 2009). Assim, uma vez em suspensão, podem adotar um voo em linha reta, que consome menos energia e permite velocidades maiores. A mesma estratégia é utilizada por beija-flores para decolar verticalmente e depois pairar e voar em velocidade, valendo-se de seu peso reduzido. De modo semelhante, algumas aves aquáticas utilizam-se da criação de vórtices na água embaixo de si para se manterem em suspensão e se locomoverem mais facilmente (Vogel, 2003).

O tamanho, peso e volume dos seres e a viscosidade do meio fluido no qual estão imersos determinam a relação entre o ser e o meio. Pequenos animais, como as borboletas, voam geralmente em fluxo laminar, em que as camadas de ar se movem suavemente e de forma ordenada em torno do corpo do animal. Nessa situação, a viscosidade do ar desempenha um papel crucial. A viscosidade é uma medida da resistência de um fluido ao fluxo e afeta diretamente como as camadas de ar se movem em torno de um corpo imerso no fluido. Em termos simples, a viscosidade do ar facilita para a borboleta manter-se em suspensão, pois as camadas de ar próximas ao seu corpo se movem de maneira mais uniforme e previsível,

tornando-se mais simples manter-se em suspensão, reduzindo a turbulência e facilitando o voo. À medida que o tamanho do animal aumenta, incluindo seu volume e densidade, o padrão de fluxo ao redor dele também se modifica (veja as Figuras 16 e 17). Por exemplo, uma borboleta que fosse cem vezes maior não conseguiria voar com a mesma frequência de batimento de asas, devido às mudanças em sua interação com o meio fluido. Essa mudança no comportamento do fluxo ao redor do animal é caracterizada pelo aumento do Número Reynolds. O Número Reynolds é uma quantidade adimensional que descreve a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas em um fluido. Em termos simples, ele ajuda a determinar se o fluxo é laminar (suave e ordenado) ou turbulento (caótico e irregular). Para ilustrar, pense em colocar a mão para fora da janela durante uma viagem de carro: conforme a velocidade aumenta, você sente o ar ficar mais "firme", o que reflete a mudança no Número de Reynolds à medida que o fluxo se torna mais turbulento. Alterar a escala, o tamanho e a forma de seu aparato de voo provocaria também um regime turbulento de locomoção, que demandaria mais potência para compensar o arraste (decorrente dos vórtices gerados pelo movimento do corpo no fluido). A alteração resultaria ainda em uma necessidade de maior velocidade e uma constituição corporal mais robusta para sustentar o voo. Por esse motivo, comparar a capacidade de voo de aviões e insetos, por exemplo, constitui uma análise ingênua, tendo em vista a considerável diferença entre os regimes de fluxo aos quais ambos estão sujeitos. Entretanto, esse entendimento desperta a atenção para possibilidades de intercâmbio entre soluções para diferentes fluidos.



ORGANISMO	NÚMERO REYNOLDS
bactérias (nadando)	0,000001
grãos de pólen (caindo) **espermatozóide** (nadando)	0,01
mosca de fruta (voando)	100
pequeno pássaro (voando)	100.000
lula (jateando rápido)	1.000.000
grande baleia (nadando)	200.000.000

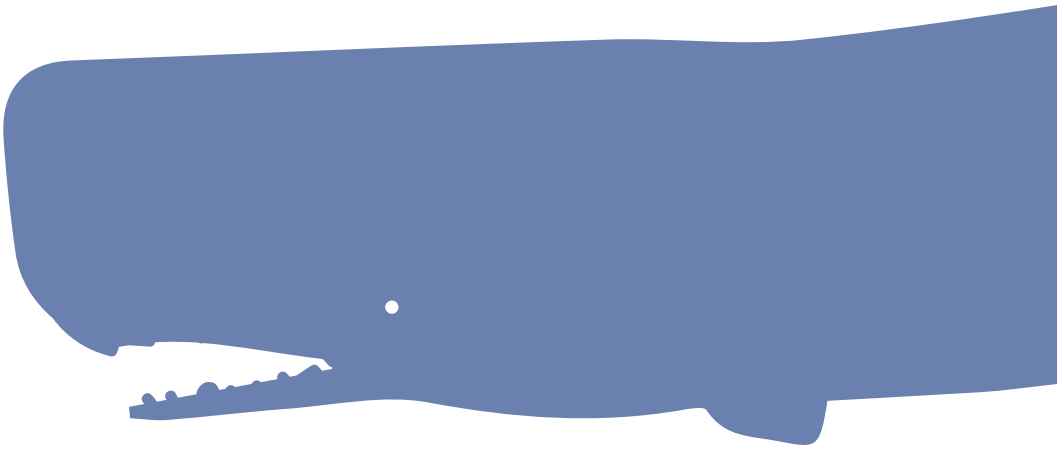


Figura 16: Valor de exemplo para o Número Reynolds de seres vivos em diferentes escalas

Fonte: elaborado pela autora a partir de ilustração cedida para o presente trabalho.[25]

25 Ilustração de Vinicius de Abreu e Carvalho.

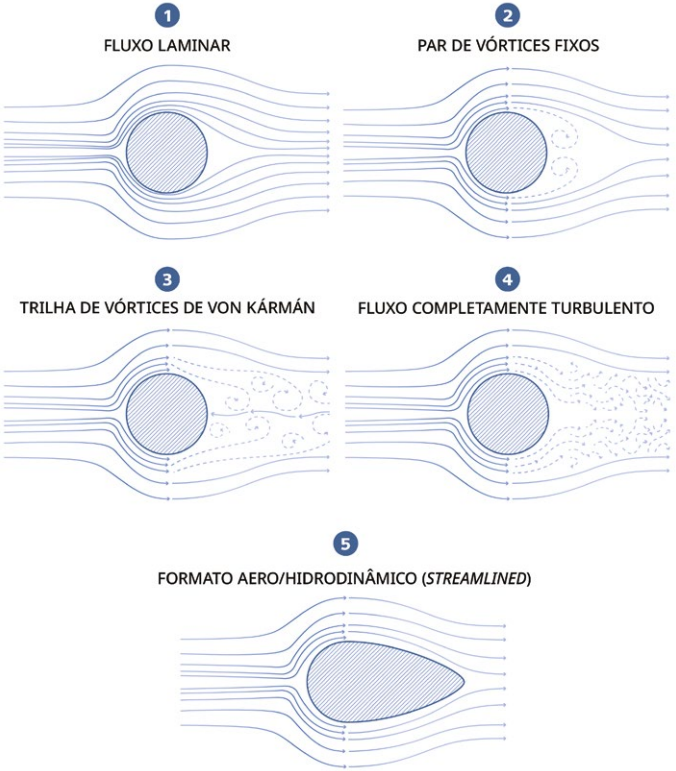


Figura 17: Regimes de fluxo e formato aero e hidrodinâmico (*streamlined*)

Fonte: elaborado pela autora a partir de ilustração cedida para o presente trabalho.[26]

A maneira como sólidos e fluidos respondem a forças externas difere fisicamente – enquanto os sólidos possuem módulo de elasticidade e respondem à tensão com uma deformação proporcional à força, os fluidos (líquidos e gases)

26 Ilustração de Vinicius de Abreu e Carvalho.

respondem à tensão, independentemente da força aplicada, compartilhando uma propriedade exclusiva: a viscosidade. Uma definição simplificada dessa propriedade seria de que a viscosidade é o quão menos fluido é um fluido. Ou seja: quanto mais rápido um gás ou líquido escoa, menor é sua viscosidade e mais fluido é o material. O coeficiente de viscosidade é calculado com base na força, velocidade, área e a razão de forças entre elas, adquirindo grande importância quando relacionado à densidade do fluido – assim obtém-se a densidade cinemática. Através dessa propriedade é possível relacionar mais facilmente líquidos e gases, o que é particularmente útil para a biomimética, principalmente na comparação de atividades análogas como voo e nado. Essas duas formas de locomoção aparentam ser absolutamente distintas em uma primeira análise, entretanto, ambas as situações tratam de um sólido imerso se locomovendo em um fluido. Através dessa compreensão foi possível que a empresa Festo desenvolvesse, por exemplo, robôs ultraleves, que voam tal como nadam as baleias, os pinguins (Figura 18a) e as arraias (Figura 18b) ou pairam no ar tal como flutuam as águas-vivas (Figura 18c). Nos exemplos de produtos bioinspirados da Figura 18, o parâmetro para construção não foi a dimensão real dos seres vivos, mas a relação entre o corpo e o fluido em que está imerso – calculados através do Número Reynolds.

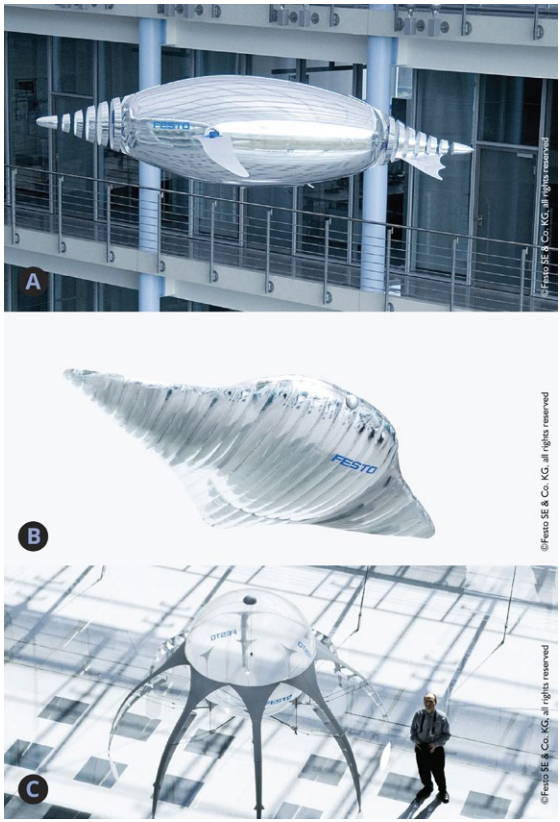


Figura 18: Robôs bioinspirados projetados pela empresa Festo

(A) Festo AirPenguin; (B) Festo AirRay; (C) Festo AirJelly.

Fonte: Divulgação Festo.[27]

27 Imagens (A), (B) e (C) tiveram seu uso neste livro autorizado pela Festo. Disponíveis em: https://www.festo.com/br/pt/e/sobre-a-festo/pesquisa-e-desenvolvimento/bionic-learning-network/destaques-de-2006-2009/air-ray-id_33851; https://www.festo.com/br/pt/e/sobre-a-festo/pesquisa-e-desenvolvimento/bionic-learning-network/destaques-de-2006-2009/airjelly-id_33841; https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/highlights-from-2006-to-2009/airpenguins-id_33788.

O Número Reynolds, cálculo desenvolvido por Osborne Reynolds em 1883, permite compreender o comportamento dos fluidos sem depender de um pensamento demasiadamente intrincado. Esse número indica a importância da viscosidade (quanto maior o índice, menor é a viscosidade) e seu papel relativo a outras variáveis (força, densidade, área, comprimento, velocidade e tempo). Nenhum dos dados requeridos é difícil de ser obtido, o que permite uma facilitada aplicação prática. O Número Reynolds é particularmente útil para a realização de experimentos em escala. Em uma experiência realizada por Vogel (2003), foi necessário representar em escala reduzida os túneis construídos por um tipo de roedor, o prairie dog (cão-da-pradaria). No entanto, modificar o tamanho dos túneis e entradas de ar alteraria os regimes de fluxo de ar e, para permitir a obtenção de dados compatíveis com a realidade, foi usado um túnel que alterou as condições naturais (aumentando a velocidade do meio) de modo a obter um Número Reynolds igual ao da situação real.

3.2 Convergência

A observação da natureza revela frequentemente a presença de soluções semelhantes em diferentes espécies, indicando um desempenho (bio)mecânico eficaz em várias formas e estruturas. Uma teoria que busca explicar esse fenômeno é a Evolução Convergente. De acordo com o livro *Convergent Evolution* de George McGhee[28] (2011), a evolução convergente é um fenômeno amplamente observado na natureza, no qual espécies distintas desenvolvem soluções similares para desafios semelhantes. Esse conceito destaca a

28 McGhee é paleobiólogo e morfologista.

capacidade da seleção natural de moldar de forma independente características semelhantes em organismos não relacionados, em resposta a pressões ambientais compartilhadas. Um golfinho,[29] por exemplo, pode se parecer com um tubarão, sobretudo se estiver nadando em sua direção. Entretanto, ainda que possua corpo fusiforme e *streamlined* (hidro e aerodinâmico), uma barbatana dorsal no centro das suas costas e uma grande nadadeira na extremidade de seu corpo ao invés de uma cauda, o golfinho não é um peixe, e sim um mamífero. Ele possui uma indubitável combinação de traços que definem um mamífero, como placenta, viviparidade, glândulas mamárias, metabolismo endotérmico, três ossos no ouvido interno, dentes de leite, fertilização interna, entre diversos outros. Ao contrário do que pode parecer, os traços que fazem golfinhos se assemelharem aos peixes não foram herdados diretamente desses animais, mas se desenvolveram de maneira convergente, a partir de outras estruturas comuns aos mamíferos, perdendo também ao longo desse percurso outros traços presentes em grande parte dos animais dessa subclasse, como pelos e pernas. Os golfinhos e baleias[30] fazem parte de um grupo de mamíferos que rumou de volta à água[31] e encontrou nesse ambiente

29 No original, McGhee se refere a uma *porpoise* (também traduzida como golfinho) e não ao golfinho tradicionalmente conhecido (golfinho nariz-de-garrafa). Entretanto, golfinhos são parentes próximos das *porpoises* e são mais conhecidos, tornando-se, portanto, mais simples utilizá-los nesse exemplo.

30 Popularmente costuma-se chamar de golfinhos os mamíferos aquáticos de pequeno porte e de baleias os mamíferos aquáticos de grande porte. Em geral, os cetáceos (Ordem: *Cetacea*) chamados de baleias são misticetos (Subordem: *Mysticeti*) e os golfinhos são odontocetos (Subordem: *Odontoceti*). No entanto, algumas baleias como as orcas e cachalotes são, na verdade, odontocetos.

31 Cerca de 405 milhões de anos depois dos peixes.

os mesmos desafios de locomoção já enfrentados por peixes ósseos e cartilaginosos e por répteis aquáticos como o *Ichthyosaurus platyodon*,[32] um réptil marinho do período Mesozoico. O sucesso de ambos os grupos de animais no meio aquático foi resultado de evoluções adaptativas convergentes que os permitiram nadar velozmente com a ajuda de seus corpos fusiformes e da modificação de seus membros em nadadeiras (Figura 19).

Figura 19: Evolução convergente de corpos fusiformes hidrodinâmicos (*streamlined*), otimizados para o nado
Fonte: elaborado pela autora.[33]

Ainda dentro dos desafios impostos pelo meio aquático, McGhee (2011) cita a transformação de membros em

32 Cerca de 230 milhões de anos depois dos peixes.

33 Imagens sob licença Creative Commons. Disponíveis em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Great_White_Shark_(14730796397).jpg; https://www.flickr.com/photos/7216770@N04/48020248356; https://www.deviantart.com/johnson-mortimer/art/Ichthyosaur-628212459; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cuvier-50-Espadon.jpg; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Daisy_the_porpoise_(6828030642).jpg.

nadadeiras com forma de pás em diversos seres de grupos evolutivamente distantes, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20: Evolução convergente de nadadeiras em forma de pás, otimizadas para nado

Fonte: elaborado pela autora.[34]

A identificação e comprovação da evolução de traços convergentes tornou-se mais simples a partir da disseminação das técnicas de decodificação genética, que permitem constatar a real proximidade (ou distância) filogenética entre indivíduos morfologicamente semelhantes (Figura 21).

34 A imagem "plesiossauro (extinto)" foi gerada por ferramenta de inteligência artificial (DALL-E) e editada pela autora. Demais imagens estão sob licença Creative Commons. Disponíveis em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Great_White_Shark_(14730796397).jpg; https://www.flickr.com/photos/7216770@N04/48020248356; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green_Turtle_Chelonia_Mydas_(224075535).jpeg; https://www.flickr.com/photos/9464116@N08/7339354228; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eurypterus_Smithsonian.jpg.

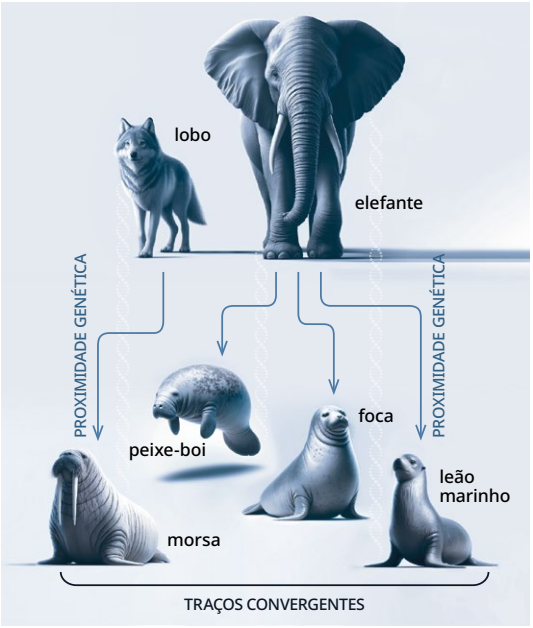


Figura 21: Traços convergentes observados em morsas e peixes-boi, espécies geneticamente distantes

Fonte: elaborado pela autora.[35]

A convergência evolutiva não deve ser tomada sob a ótica teleológica ou funcionalista dentro da noção de que "forma segue a função", pois, além das pressões ambientais a que as espécies estão submetidas, deve-se considerar a capacidade (ou propensão) genética de cada indivíduo em gerar ou modificar estruturas existentes. Mamíferos com pescoços peculiarmente longos poderiam ter surgido em outros locais do planeta; no entanto, é provável que somente um certo

35 Imagens geradas por ferramenta de inteligência artificial (DALL-E) e editadas pela autora.

grupo de indivíduos habitante das planícies africanas possuía aparato genético para tal – e combinado às pressões seletivas daquele ambiente em particular, surgiram o que conhecemos como girafas. Explica McGhee (2011) que animais com forma semelhante aos mitológicos centauros dificilmente se originaram de mamíferos, considerando que os animais dessa subclasse de vertebrados possuem somente quatro membros[36] locomotores disponíveis para modificações evolutivas. Portanto, de acordo com o que pôde ser observado até então, não haveria possibilidade de surgimento de dois novos membros.

Figura 22: Morfologia centauroide

(A) Ilustração de um centauro;
(B) Espécie de mantis (louva-a-deus).

Fonte: (A) se encontra sob domínio público. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_antiquities_of_Herculaneum_(1773)_(14590988577).jpg; (B) se encontra sob licença Creative Commons. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Praying_mantis_india.jpg.

36 Ao ler o trecho em questão é possível que você tenha se perguntado como se situam as baleias, que são mamíferos, mas não aparentam possuir quatro membros locomotores. Ao longo de milhões de anos, à medida que os mamíferos ancestrais se adaptavam à vida aquática, a seleção natural favoreceu indivíduos com corpos aerodinâmicos e capacidades de natação aprimoradas. Os membros posteriores se tornaram, então, menos necessários (ou eficientes) para a propulsão na água, resultando em uma gradual redução e culminando em estruturas vestigiais e não funcionais.

Há grupos de seres vivos, por outro lado, que possuem tal capacidade baseada em sua filogenia. Algumas linhagens de artrópodes exibem seis membros locomotores, tendo sido capazes de resultar em seres centauroides,[37] como o mantis, popularmente chamado de louva-a-deus (Figura 22). Pelo mesmo motivo seria improvável o surgimento de seres com a morfologia dos dragões mitológicos: os répteis, que supostamente dariam origem a eles, possuem apenas dois pares de membros para serem modificados.

Um exemplo elaborado por McGhee (2011) ilustra o conceito de evolução convergente moldada tanto por limitações físicas quanto por limitações filogenéticas. Na natureza são encontrados diversos animais planadores, com representantes entre mamíferos, répteis, anfíbios, peixes e até mesmo em formigas.

Desde o período Cretáceo, pelo menos sete grupos de mamíferos evoluíram a capacidade de planar através de prolongamentos de membranas. Atualmente, diversos exemplos ainda são encontrados na natureza, como os esquilos-voadores (roedores da ordem *Rodentia*, pertencentes à tribo Pteromyini), com ampla distribuição em todos os continentes, exceto na África, onde são encontrados outros animais conhecidos como "esquilos" voadores de cauda escamada (que não são de fato esquilos). No sudeste asiático, os lêmures-voadores, ou colugos (Dermópteros, da ordem Dermoptera, mais próxima aos primatas que aos roedores), evoluíram os mesmos traços convergentes. Por

37 "Centauroide" é um termo que se refere a formas ou atributos semelhantes aos dos centauros – criaturas da mitologia grega que possuem o corpo de um cavalo e o torso de um ser humano.

fim, essa morfologia também evoluiu em marsupiais, sendo encontrada em três diferentes grupos de gambás voadores da Austrália e de algumas partes do sudeste asiático (Figuras 23 e 24).

Figura 23: Evolução convergente de morfologias de planagem em mamíferos

(A) Esquilo-voador pertencente à tribo Pteromyini (família Sciuridae); (B) Petauro-do-açúcar (*Petaurus breviceps*), espécie de *opossum* planador originária do leste e norte da Austrália, da Nova Guiné e do Arquipélago de Bismarck; (C) Espécie de roedor chamado esquilo voador pigmeu de cauda escamada (*Idiurus zenkeri*), que não é de fato um esquilo. É encontrado em Camarões, República Centro-Africana, República do Congo, República Democrática do Congo, Guiné Equatorial e Uganda; (D) Colugo, ou lêmure-voador, é natural do sudoeste asiático e pertence à ordem Dermoptera.

Fonte: (A) foi licenciada pela autora para o presente trabalho. Disponível em: https://www.alamy.com/southern-flying-squirrel-glaucomys-volans-voplaning-or-gliding-at-night-steering-and-balancing-with-its-tail-arizona-usa-image462230639.html. (B) se encontra sob licença Creative Commons. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63144901. (C) se encontra em domínio público https://en.wikipedia.org/wiki/File:AnomalurusPusillusSmit.jpg. (D) se encontra sob licença Creative Commons. Disponível em: https://www.flickr.com/photos/23732062@N04/19091984902.

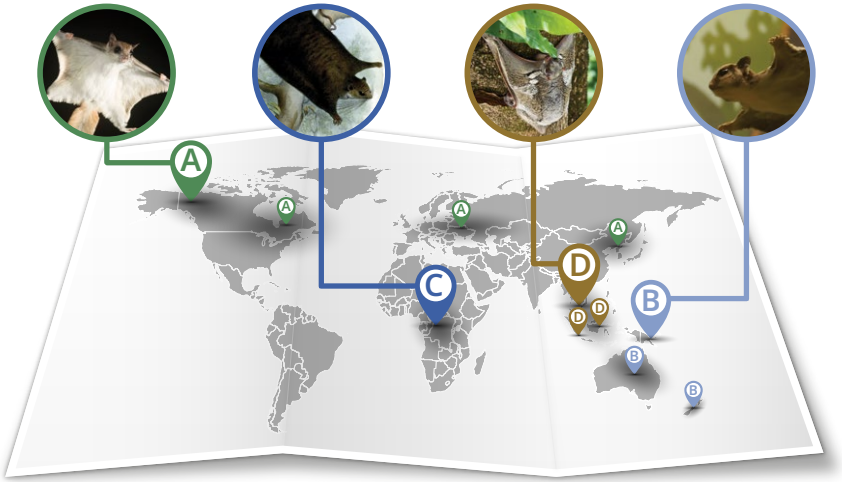


Figura 24: Distribuição geográfica de mamíferos planadores
Fonte: elaborado pela autora.

Em todos os mamíferos, nota-se que as morfologias de planagem decorrem de prolongamentos de membranas, que são, de acordo com McGhee (2011), a maneira "encontrada" filogeneticamente pelas espécies para operar tais mudanças. Os prolongamentos de membrana também capacitaram um grupo de anfíbios a evoluir uma morfologia planadora, como nos sapos-voadores-de-árvore, cujo processo evolutivo gerou dedos alongados para estocar as membranas (Figura 25).

Figura 25: Evolução convergente de morfologias de planagem em anfíbios

(A) Sapo-voador-de-wallace;
(B) Sapo-voador-de-wallace planando.

Fonte: (A) se encontra sob licença Creative Commons. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=51422142. (B) foi licenciada pela autora para o presente trabalho. Disponível em: https://www.alamy.com/stock-photo-wallaces-abah-river-flying-frog-rhacophorus-nigropalmatus-gliding-71426079.html.

Já nos répteis, o caminho filogenético possível para o surgimento dessas morfologias foi o do achatamento dorsoventral e alargamento lateral, como apresentado nos lagartos do gênero *Draco* (Figuras 26a e 26b) e nas cobras-voadoras-do-paraíso, pertencentes ao gênero *Chrysopelea* (Figuras 26c e 26d). Durante o voo, essa espécie de cobra exibe uma mudança considerável em sua forma, assemelhando-se a uma fita, o que a torna capaz de fazer curvas de 90°.

Figura 26: Evolução convergente de morfologias de planagem em répteis

(A) *Draco volans*, lagarto-planador do gênero *Draco*; (B) Ilustração de achatamento e prolongamento de costelas dos lagartos-planadores; (C) Serpente-voadora-do-paraíso; (D) Serpente-voadora-do-paraíso planando ao saltar de uma árvore a outra.

Fonte: (A), (B) e (C) se encontram sob licença Creative Commons. Disponíveis em: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26213924; https://www.inaturalist.org/photos/42586960. (D) foi licenciada pela autora para o presente trabalho. Disponível em: https://www.alamy.com/paradise-flying-snake-chrysopelea-paradisi-sabah-borneo-malaysia-image181588234.html.

A capacidade de planar surgiu também em dois grupos distintos de peixes, através da modificação das suas nadadeiras peitorais em formas alongadas, que são esticadas quando os peixes se lançam da água (Figura 27).

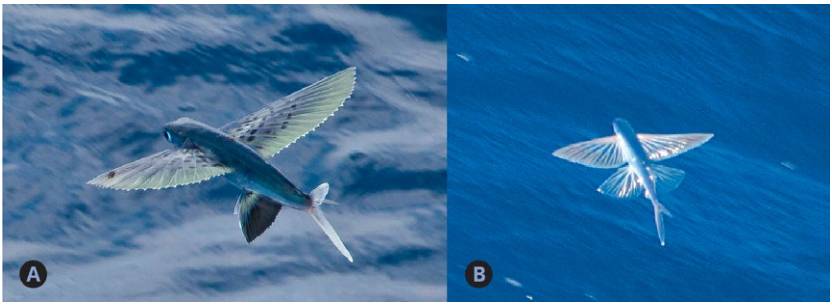


Figura 27: Evolução convergente de morfologias de planagem em peixes

(A) Peixe-voador planando ao saltar da água;
(B) Peixe-voador com dois pares de nadadeiras laterais abertas.

Fonte: (A) e (B) se encontram sob licença Creative Commons. Disponíveis em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flying_Fish_(5800263376).jpg; https://www.flickr.com/photos/therontrowbridge/8152593248.

Por fim, três grupos de formigas evoluíram separadamente as morfologias de planagem: dois desses grupos planam com as costas para baixo e o abdômen para cima (Figura 28).

Animais e insetos com asas e voo ativo são outro exemplo clássico de evolução convergente: pássaros, dinossauros e morcegos desenvolveram asas através de diferentes modificações em seus membros superiores, enquanto insetos, de maneira radicalmente distinta, desenvolveram asas derivadas das guelras presentes na forma larval.

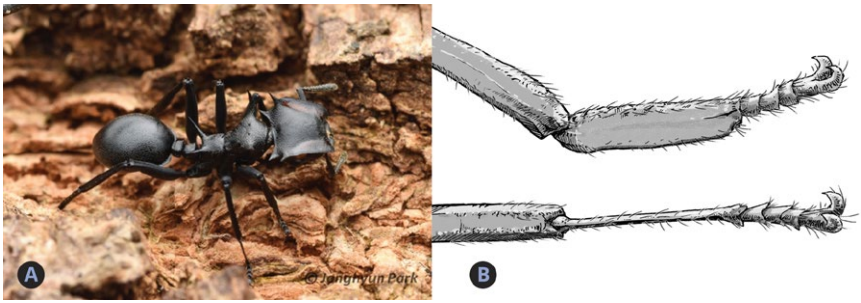


Figura 28: Evolução convergente de morfologias de planagem em artrópodes

(A) Formiga-planadora;
(B) Detalhe do formato achatado dos membros das formigas planadoras.

Fonte: (A) se encontra sob licença Creative Commons. Disponível em: https://www.inaturalist.org/photos/102613551. (B) detalhe do formato achatado dos membros das formigas planadoras. Ilustração de Vinícius de Abreu e Carvalho.

Grande parte dos exemplos de evolução convergente tratam de aparatos locomotórios – asas, nadadeiras, remos e, conforme pontuado por McGhee (2011), até mesmo o surgimento de pernas é uma evolução convergente. Tanto artrópodes quanto vertebrados evoluíram pernas, mas de duas maneiras distintas: vertebrados com a estrutura interna dos ossos e a musculatura externa e artrópodes com exoesqueleto[38] articulado internamente pelos músculos.

Todos os seres vivos evoluíram a partir de um mesmo conjunto de organismos e compartilham uma estrutura comum: o DNA, o que é chamado por McGhee (2011) de "homologia profunda". Os elos que os unem, entretanto, estão separados por milhares de anos de mutações cumulativas,

38 Esqueleto externo de quitina, característico dos artrópodes.

que resultaram em estruturas elaboradas e complexas que permanecem em constante mutação.

Para reconhecer a evolução convergente, é necessário compreender cinco conceitos essenciais:

- **Sinapomorfismo**,[39] ou traços sinapomórficos, são características distintas herdadas de um ancestral comum e que definem o pertencimento a um determinado grupo, ou clado[40] (por exemplo, traços que definem o golfinho como mamífero). Exemplo: As penas nas aves são um exemplo de traço sinapomórfico, herdado de um ancestral comum e que define o grupo das aves;
- **Homoplasias** são características semelhantes entre dois seres vivos, mas que não foram herdadas de um ancestral comum. Há três formas através das quais os traços homoplásticos podem surgir: convergência, paralelismo e reversão (Figura 29a). Exemplo: O formato do corpo hidrodinâmico do golfinho e do tubarão é uma homoplasia, pois ambos desenvolveram essa característica independentemente para se adaptarem ao ambiente aquático.
  - **Convergência**, ou evolução convergente, se refere ao processo em que espécies diferentes desenvolvem evolutivamente características semelhantes sem que as tenham herdado de um ancestral comum. Esses traços convergentes surgem de adaptações ocorridas de forma independente e a partir de estruturas distintas (Figura 29b). Exemplo: As asas dos morcegos e dos pássaros são

39 McGhee pontua que, particularmente na literatura mais antiga, o sinapomorfismo é referido como homologia.

40 Clado é um agrupamento que inclui um ancestral comum e todos os seus descendentes (viventes e extintos).

um exemplo de convergência, pois surgiram independentemente para permitir o voo em diferentes grupos de vertebrados.

- **Paralelismo**, ou evolução paralela, é uma forma particular de convergência em que um determinado traço evolui paralelamente, a partir da modificação de uma mesma estrutura comum (Figura 29c). Exemplo: A presença de presas afiadas nos dentes de diferentes espécies de carnívoros, como os leões e os tigres, exemplifica o paralelismo, onde a modificação evolutiva ocorre em estruturas semelhantes de diferentes grupos.
- **Reversão**, ou evolução reversa, ocorre quando algum traço herdado já modificado é revertido para o traço anterior (Figura 29d). Exemplo: O reaparecimento de membros nas serpentes cegas da família Typhlopidae é um exemplo de reversão, onde uma característica perdida anteriormente é recuperada ao longo da evolução.

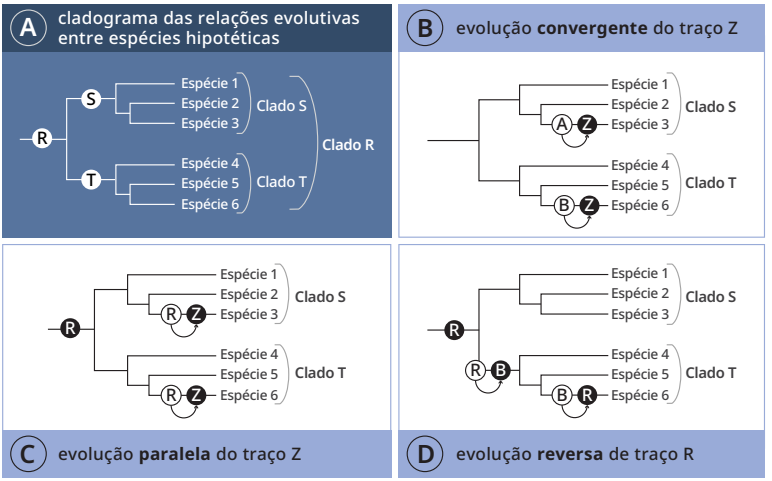


Figura 29: Cladogramas de relações evolutivas entre espécies

Fonte: elaborado pela autora a partir de McGhee (2011, p. 2-4).

A presença de soluções convergentes na natureza presume um percurso anterior de divergência em que foram geradas diversas variantes de soluções biológicas. Dessa forma, pode-se observar um arcabouço vasto de estruturas biológicas que torna afortunada a pesquisa para a biomimética.

3.3 Percursos evolutivos e a geometria da evolução

> Nossos resultados suportam fortemente a hipótese de que os elementos essenciais da estrutura orgânica são altamente limitados por regras geométricas, processos de crescimento e pelas propriedades dos materiais. Isto sugere que, dado um tempo suficiente e um número extremamente grande de experiências evolutivas, a descoberta por organismos de "bons" projetos – aqueles projetos que são viáveis e que podem ser construídos com materiais disponíveis – era inevitável e em princípio previsível (Thomas; Reif, 1993, p. 342).

Em *The Geometry of Evolution: Adaptive Landscapes and the Theoretical Morphospaces* (A Geometria da Evolução: Panoramas Adaptativos e os Morfoespaços Teóricos), George McGhee (2006) aborda dois quadros conceituais centrais para a compreensão do fenômeno da evolução convergente e sua relação com a morfologia dos seres vivos. São eles: panoramas adaptativos, termo criado pelo geneticista americano Sewall Wright,[41] e morfoespaço teórico, criado pelo paleontólogo David M. Raup.

41 Sewall Wright, juntamente com os cientistas britânicos R. A. Fisher e J. B. S. Haldane, desenvolveu a síntese neodarwiniana da teoria da evolução em 1930.

3.3.1 Panoramas adaptativos *(adaptive landscapes)*

A metáfora do *adaptive landscape*[42] propõe que a evolução via seleção natural pode ser visualizada através do percurso de topos e vales adaptativos. De acordo com McGhee (2006), esta proposta é uma forma simples e poderosa de visualizar a evolução da vida. O conceito propõe que a correlação entre traços genéticos[43] cruzados em dois eixos daria origem a um mapa de relevo com topografia composta por montanhas, picos e vales (Figura 30). Se, por exemplo, um determinado gene tivesse 10 alelos (repetidos nos eixos x e y), haveria 100 possíveis combinações entre eles. Entretanto, a maioria das 100 possíveis combinações não existe na natureza, sendo encontradas apenas cerca de 10 das opções. Ou seja, há 90 possibilidades que potencialmente poderiam existir, mas isso não acontece. Assim, Wright propôs que essas 90 combinações genéticas teriam "adaptação zero", representando combinações genéticas letais. As outras 10 possibilidades teriam valores maiores que zero, provavelmente variando dentro de uma gama de valores adaptativos (na metáfora das montanhas e no gráfico proposto, cada valor adaptativo seria representado por uma determinada cota altimétrica,

42 A crítica ao conceito de *adaptive landscape* foi de que ele possuiria apenas valor heurístico, para a criação de modelos conceituais, não sendo aplicável no estudo de animais e plantas existentes. Essa crítica se tornou inválida em 1966, quando David Raup utilizou simulações computacionais para modelar formas hipotéticas de vida que jamais existiram ao longo da evolução. Subsequentemente, Raup elaborou o conceito de *theoretical morphospaces*. (McGhee, 2006, p. 11).

43 O conceito foi inicialmente proposto por Wright, sendo relacionado aos traços genéticos e chamado originalmente *fitness landscape*. O mesmo conceito é utilizado por geneticistas, baseando-se em traços gênicos (chamado *fitness landscape*), e por morfologistas, baseando-se em traços morfológicos (chamado *adaptive landscape*).

enquanto a adaptação zero seria representada pela planície e pelos vales ao nível de altitude zero) (McGhee, 2006).

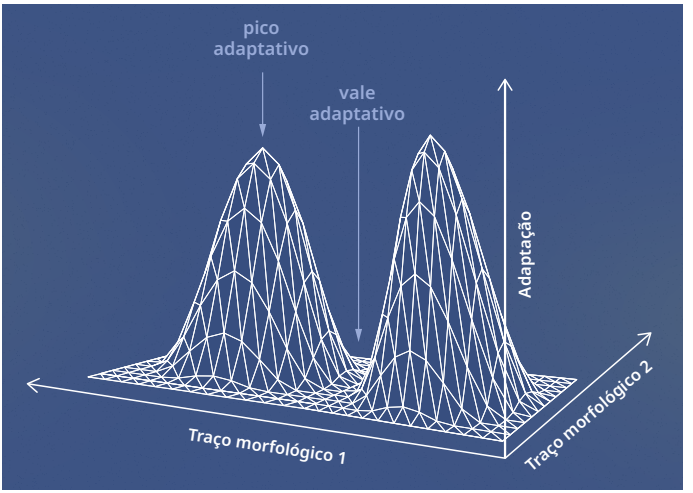


Figura 30: Ilustração do conceito de panoramas adaptativos (*adaptive landscapes*) proposto por McGhee (2006)
Fonte: elaborado pela autora.

Como morfologista, McGhee (2006) utiliza o conceito de *adaptive landscape* para conduzir a análise. O grau de adaptação dos possíveis traços morfológicos seria determinado pela análise funcional das formas potenciais (Figura 31). O arranjo geométrico dos picos no mapa representaria então duas possíveis formas de vida disponíveis para os organismos analisados, enquanto as planícies e vales representam morfologias não funcionais.

De acordo com McGhee (2006), o conceito dos *adaptive landscapes* seria correlato ao cerne da seleção natural:

o diferencial de sucesso reprodutivo de vários fenótipos ou morfologias. Assim, no nível das espécies, cada uma tende a traçar uma trajetória ascendente rumo ao cume da montanha ao longo de gerações e em função das taxas reprodutivas maiores dos seres com morfologias mais adaptadas (Figura 31).

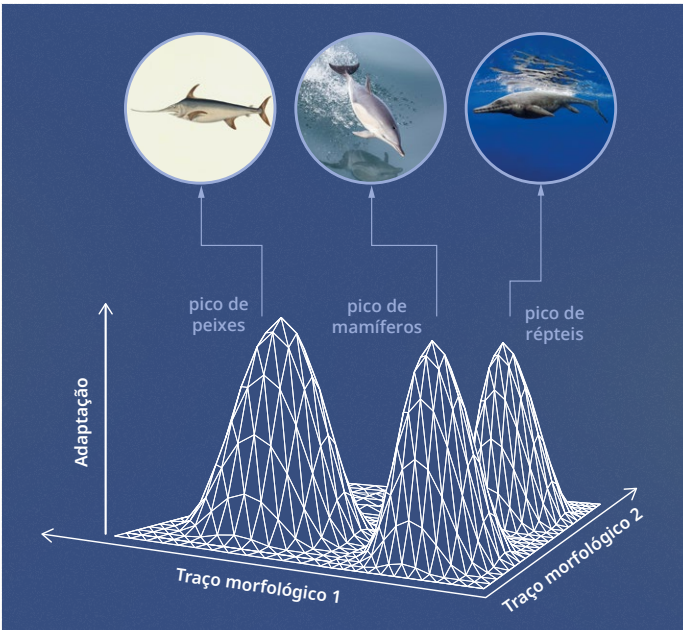


Figura 31: Ilustração dos conceitos de panoramas adptativos e evolução convergente em espécies aquáticas, baseada em McGhee (2006)

Fonte: elaborado pela autora.[44]

44 Imagens sob licença Creative Commons. Disponíveis em: https://www.flickr.com/photos/7216770@N04/48020248356; https://www.deviantart.com/johnson-mortimer/art/Ichthyosaur-628212459; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cuvier-50-Espadon.jpg.

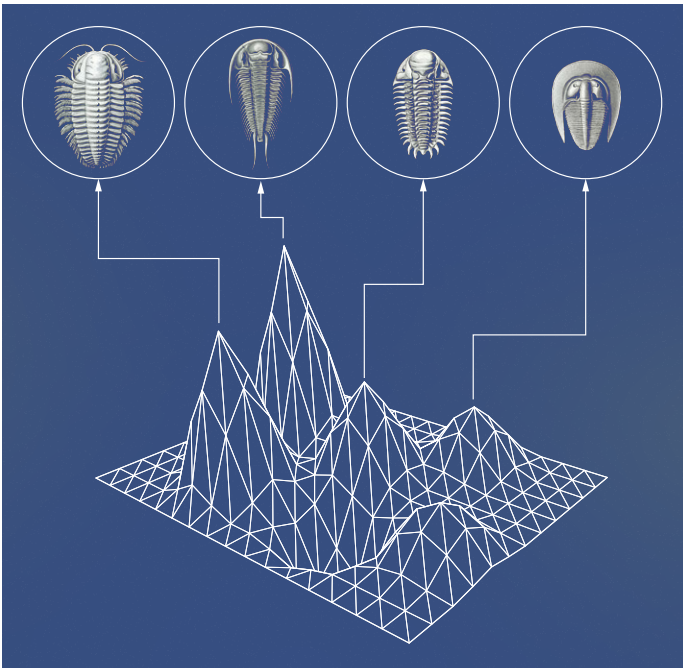


Figura 32: Ilustração dos conceitos de panorama adaptativo da evolução dos trilobitas (artrópodes marinhos paleozoicos) baseada em McGhee (2006)

Fonte: elaborado pela autora.[45]

O autor pontua, entretanto, que a referência do cume da montanha como o grau máximo de evolução somente funciona em um quadro teórico estático. No contexto real, as pressões seletivas são consequência dos variados, complexos e permanentemente mutáveis desafios seletivos. Os ambientes, a concorrência e as relações de predação seriam algumas dessas demandas ambientais em constantes

45 Imagens sob domínio público. Disponíveis em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Haeckel_Aspidonia.jpg.

(ainda que lentas e graduais) mudanças. Dentro desse quadro conceitual, a extinção de espécies seria resultado da incapacidade de uma ou mais espécies em subir novas montanhas frente a um novo desafio imposto pelo meio ambiente (McGhee, 2006).

3.3.2 Morfoespaços teóricos (*theoretical morphospaces*)

O segundo conceito, de *theoretical morphospace*, é definido por McGhee (2006) como "hiperespaço geométrico n-dimensional produzido através da variação sistemática de valores paramétricos do modelo geométrico de uma forma". Apesar da explicação complexa, o conceito pode ser claramente compreendido quando ilustrado. A Figura 33 traz o exemplo gerado através de simulação computacional de objetos em forma de concha. Através da variação de dois parâmetros: taxa de expansão da espiral[46] e número de translações, podem-se observar diferentes morfologias resultantes: as mais acima e à esquerda lembram conchas de caramujos (gastrópodes), enquanto as mais abaixo e à direita assemelham-se mais às ostras (bivalves).

46 Apesar de a espiral remeter quase instantaneamente às conchas de moluscos, as formas helicoidais têm ocorrência ubíqua na natureza, por exemplo o próprio DNA – observação frisada por McGhee (2006). Cabe pontuar também que na natureza a espiral presente é a equiangular, e não a mais conhecida espiral de Arquimedes, conforme observado por D'Arcy Thompson no livro *On Growth and Form* (Sobre Forma e Crescimento) (2007, p. 176-177).

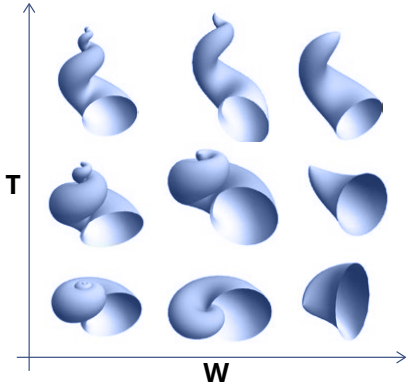


Figura 33: Representação de morfoespaço teórico simulando possíveis variações de formas de conchas

O eixo W representa a taxa de expansão da espiral da concha e o eixo T representa sua taxa de translação.

Fonte: elaborado pela autora utilizando a ferramenta criada por Contreras-Figueroa, G; Aragón, J. L. A.[47]

Utilizando esse quadro de possibilidades formais para conchas, elaborado em dois eixos, é possível compor um diagrama de montanhas e vales, semelhante ao dos *adaptive landscapes*. Nesse diagrama, porém, o terceiro eixo representa a taxa de ocorrência da morfologia na natureza.

Diferentemente dos *adaptive landscapes*, os *theoretical morphospaces* não levam em conta o grau de adaptação das soluções para a constituição do diagrama. As montanhas formadas no gráfico representam ocorrências da forma na natureza e as planícies podem representar tanto as que ainda não ocorreram, mas são possíveis, quanto as de ocorrência

47 Disponível em: https://github.com/jlaragonvera/Mathematica-Notebooks.

impossível ou de adaptação zero. Esse ponto de vista assume que algumas das formas não existentes poderiam funcionar perfeitamente na natureza, mas o processo evolutivo simplesmente não as gerou. A não geração delas abre a discussão sobre as restrições evolucionárias (Figura 34).

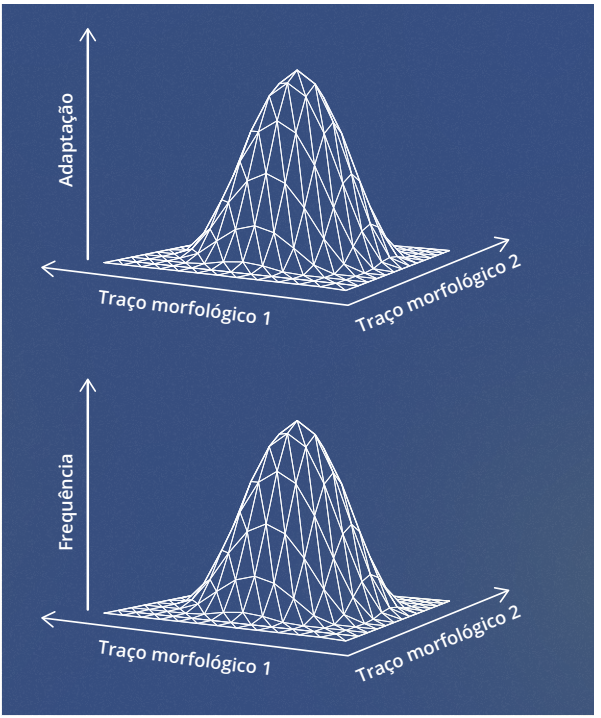


Figura 34: Ilustração dos conceitos de panorama adaptativo (acima) e morfoespaço teórico (abaixo), baseada em McGhee (2006)
Fonte: elaborado pela autora.

Embora os *theoretical morphospaces* não utilizem uma medida para o nível de adaptação de cada solução, esta característica

pode ser, de certo modo, mapeada através dos diagramas resultantes. De acordo com McGhee (2006), grande parte da riqueza da análise dos morfoespaços teóricos reside extatamente nos espaços vazios que eles evidenciam. Qual seria a razão para que não haja (ou tenha havido) ser vivo com determinadas formas? A resposta para essa questão envolve as limitações que permeiam a existência dos seres vivos, sendo as principais de duas naturezas distintas: as evolucionárias[48] e as filogenéticas. Através da elaboração dos diagramas, podem-se constatar relações vantajosas e desvantajosas entre as variáveis e inferir o sucesso (ou fracasso) de cada conjunção em particular.

Também de modo diferente dos panoramas adaptativos, os morfoespaços teóricos não dimensionam o grau de adaptação de cada solução individualmente. As montanhas formadas no gráfico representam, portanto, a ocorrência da forma na natureza, enquanto os planos no nível zero podem representar tanto as formas pouco eficientes (e, consequentemente, selecionadas negativamente) quanto as formas que ainda não surgiram (devido a restrições desenvolvimentais, por exemplo).

Um trabalho na área publicado por Ellison e Niklas (1988 *apud* McGhee, 2006) desenvolveu através de simulação computacional um morfoespaço teórico de plantas hipotéticas, no qual duas dimensões morfológicas foram correlacionadas: a probabilidade de um galho continuar a crescer *versus* a

48 Limitações evolucionárias, também chamadas de limitações desenvolvimentais, arquitetônicas, fabricacionais, construtivas, ontogenéticas e morfogenéticas.

probabilidade de se bifurcar.[49] Esse morfoespaço teórico foi posteriormente ampliado a partir da adição de propriedades como ângulo e orientação dos galhos, que são fatores capazes de alterar consideravelmente a exposição à luz nas plantas. Esse quadro de possibilidades foi transformado pelos autores em um panorama adaptativo capaz de apontar as formas hipotéticas mais eficientes (e provavelmente mais prevalentes) de plantas com base na geometria em função de suas demandas e propriedades biológicas.[50]

Outro trabalho, elaborado por Karl J. Niklas[51] (1997 *apud* McGhee, 2006), avaliou o posicionamento das folhas de plantas nos galhos em relação umas às outras[52] através dos *theoretical morphospaces*, transformados em *adaptive landscapes* pela adição da dimensão/eixo "eficiência energética" (Figura 35). Através do diagrama, Niklas constatou que o arranjo em espiral seguindo a sequência de Fibonacci tem prevalência maior em plantas cujas folhas são mais alongadas, enquanto há uma variância grande desse padrão em plantas com folhas mais largas. O diagrama do *theoretical morphospace* permite visualizar que as folhas mais alongadas dispostas ao longo dos galhos na angulação de Fibonacci

49 Ver MCGHEE, G. R. **The Geometry of Evolution**: Adaptive Landscapes and Theoretical Morphospaces. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, p. 83.

50 Ver MCGHEE, G. R. **The Geometry of Evolution**: Adaptive Landscapes and Theoretical Morphospaces. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, p. 87.

51 No livro *The Evolutionary Biology of Plants* (A Evolução Biológica das Plantas).

52 Considerando o posicionamento das folhas em um galho, é natural que uma não fique exatamente abaixo de outra para que todas estejam aptas a receber a luz do sol. Assim, a posição dos galhos pode ser descrita como helicoidal ao redor do galho, variando em dois parâmetros: distância vertical e distância horizontal.

(137,5°) recebem um índice maior de incidência solar, sendo mais eficientes energeticamente e perpetuando sua morfologia (através dos genes) com mais sucesso. Já em folhas com formas mais arredondadas, a eficiência na captação de luz é muito menor, mesmo quando arranjadas em ângulos de Fibonacci, em função da sobreposição de umas às outras. O arranjo nos galhos com a angulação indicada lhes confere apenas uma ligeira vantagem, não se tornando especialmente prevalente ao longo de gerações como no caso anterior.

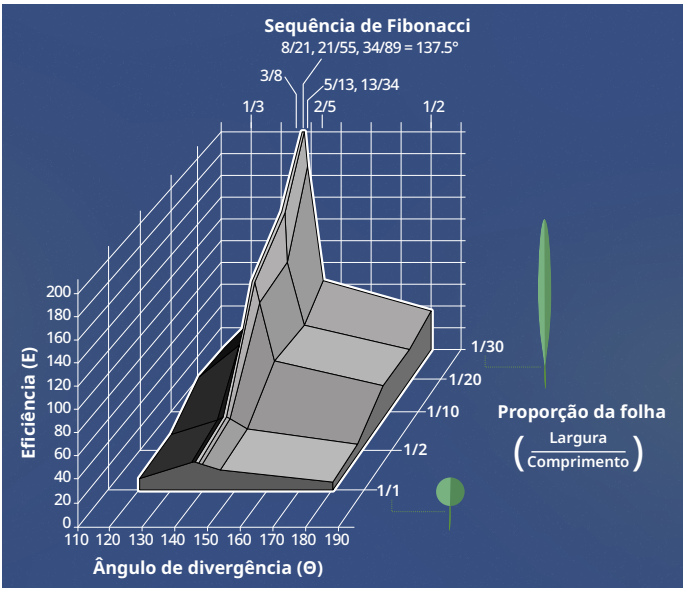


Figura 35: Ilustração do morfoespaço teórico elaborado por Karl J. Niklas, relacionando a distribuição das folhas e suas proporções em diversas espécies

Fonte: elaborado pela autora.

3.4 Limitações, viabilidade e convergência como fatores-chave

A viabilidade dos seres vivos está pautada tanto por limitações físicas, químicas e mecânicas quanto por limitações filogenéticas. Outro fator-chave para a análise técnica das soluções biológicas são os fatores sistêmicos dos ecossistemas e fatores micro e macroclimáticos, que determinam grande parte das pressões seletivas. Apesar dessas restrições (ou talvez em resposta a elas, como indicariam alguns estudos em epigenética), os seres vivos exibem um número muito elevado de "soluções" para diversos desafios. A análise ampla desse quadro aponta o fenômeno da convergência evolutiva, potencialmente enriquecedor para a biomimética.

Capítulo 4

Forma, função e limitação

Em um ambiente de pressões seletivas, há uma tendência de que as morfologias mais eficientes tenham prevalência sobre as de menor eficiência, conforme relacionado através dos panoramas adaptativos, dos morfoespaços teóricos e de estudos como o desenvolvido por Niklas, capazes de revelar tendências morfológicas relacionadas à eficiência.

O comportamento mecânico e a viabilidade dos seres vivos estão intrinsecamente ligados ao seu tamanho, escala e relações com os fluidos nos quais estão imersos. O tamanho dos seres vivos está submetido à sua viabilidade física no que diz respeito, por exemplo, à capacidade de sustentação do próprio corpo e ao funcionamento das micro e macroestruturas. No que se refere à viabilidade técnica, as construções da natureza se pautam pela similaridade elástica e não pela similaridade geométrica. Assim, não se poderia deliberadamente aumentar a escala de um ser vivo, pois isso acarretaria resultados biomecanicamente inviáveis, conforme já foi descrito no século XVII por Galileu. Desse modo, a escala é um componente fundamental a ser considerado quando tratamos da transposição de formas da natureza para artefatos tecnológicos.

Além das limitações físicas e biomecânicas, o percurso evolutivo das espécies está pautado também pela filogenia. Toda solução que existe (ou existiu) é viável (bio)mecanicamente. Porém, muitas das estruturas exibidas pela natureza são "gambiarras biológicas", surgidas em um contexto filogenético específico e sendo otimizadas apenas quando se considera seu próprio percurso – não necessariamente

quando se consideram todas as demais soluções para o mesmo desafio já encontradas na natureza.

Em diversas ocasiões, ao longo do percurso evolutivo, espécies diferentes encontraram soluções morfológicas semelhantes para os mesmos problemas. Os reflexos conceituais e teóricos dos estudos em evolução convergente na biologia podem contribuir de maneira consistente para a biomimética. É provável que soluções convergentes estejam mais aptas a contribuir para o design, uma vez que elas perpassam, mas não se limitam às restrições filogenéticas.

Nesse contexto, muitas das soluções convergentes da natureza serão compartilhadas com espécies já extintas, como no exemplo de formas otimizadas para o nado, desenvolvido por McGhee. Esse fato não enfraquece os indícios de que essa morfologia apresenta vantagem em relação a outras, muito pelo contrário. Desse modo, é evidente que as razões para a extinção de espécies são as mais diversas, variando desde os fatores intrínsecos aos indivíduos, passando pelas relações com outros componentes do ecossistema e chegando aos fatores de ordem micro e macroclimáticas.

Além dos aspectos divergentes e convergentes da evolução, a observação de fenômenos e processos naturais é capaz de levantar provocações que questionam as possibilidades tecnológicas e instigam novos saltos da tecnologia humana. Conforme pontuado por Nachtigall, a natureza é capaz de exibir e atestar a possibilidade de existência de algumas soluções. Assim, é inegável a sua contribuição para a tecnologia: mesmo que algo não seja replicável ou exequível dentro do

contexto tecnológico, sabe-se que é, ao menos, possível. Não se trata, portanto, apenas da eficiência de cada mecanismo, mas da peculiaridade da solução e formas alcançadas através do processo evolutivo.

O funcionamento de estruturas orgânicas é radicalmente diferente dos artefatos tecnológicos construídos pelo homem. Essa diferença demanda um refinamento no olhar ao analisar as soluções da natureza – que deve contemplar, por exemplo, a compreensão de conceitos biomecânicos, bioquímicos, paleontológicos, de ecossistemas, entre outros. Por esse mesmo motivo, os recursos tecnológicos disponíveis[53] para a construção de artefatos biomiméticos também oferecem grande limitação ao de "componentes" semelhantes aos orgânicos.

Quando se trata das tecnologias de materiais e processos de fabricação, os materiais biológicos apresentam indiscutível superioridade, sobretudo em função de seus métodos de fabricação (hierarquicamente, da nano à macro escala). Embora essas áreas apresentem avanços contínuos, a cópia fiel de estruturas biológicas ainda é impossível. Assim, há que se considerar também essa restrição em processos bioinspirados, para que sejam feitas as adaptações necessárias em termos de materiais. Dessa forma, a biomimética demanda uma nova classe de materiais, bem como as áreas de biomateriais (materiais biocompatíveis) e prostética. Os avanços

53 A exemplo de componentes eletromagnéticos ou fotônicos, como sensores, motores e microcontroladores, para citar alguns.

constantes na tecnologia de materiais[54] têm colaborado para a expansão das possibilidades da biomimética.

54 Como hidrogéis, compósitos diversos e polímeros eletroativos (frequentemente aplicados no desenvolvimento de músculos artificiais), entre outros.

CONCLUSÕES

A evolução dos seres vivos é pautada pela viabilidade (bio) mecânica de suas estruturas tal qual as demais estruturas artificiais que estejam submetidas às mesmas condições físicas e ambientais. Além dos fatores mecânicos, a evolução desenvolvimental das espécies é dirigida também pela filogenia. Por fim, os espécimes surgidos na natureza passam por fatores de seleção determinados pelo ambiente em que se encontram. Considerando tanto as limitações biomecânicas e evolucionárias quanto as restrições tecnológicas relacionadas a processos e materiais, a investigação da natureza pode oferecer valiosas inspirações para o desenvolvimento de novas tecnologias em diversas áreas.

Em função da grande diversidade observada, é possível encontrar variadas e eficazes soluções aplicáveis aos mais diversos problemas projetuais, que foram geradas a partir de um longo percurso evolutivo. No entanto, não se pode afirmar que toda e qualquer espécie possa contribuir significativamente para processos de desenvolvimento em biomimética. O preceito de que tudo o que existe já foi "chancelado" pela seleção natural é incompleto: os seus mecanismos de seleção são intrínsecos aos diferentes nichos, ambientes ou ecossistemas e se encontram em constante mutação. Problemas e soluções específicos encontrados nos seres vivos não necessariamente são extrapoláveis para outros contextos que não o da espécie e de seus ancestrais. Assim, recomenda-se que em processos de biomimética os fatores de seleção natural sejam levantados e avaliados criticamente. Devem ser consideradas também possíveis pressões externas que eventualmente contribuíram para tal caminho evolutivo, como a seleção artificial e as mudanças bruscas no ambiente. Por

fim, fica evidente a importância do raciocínio interdisciplinar e da imersão em conceitos da biologia para que se possa desenvolver projetos tecnologicamente relevantes através da biomimética.

REFERÊNCIAS

AHMAR, S. A. S. EL. **Biomimicry as a Tool for Sustainable Architectural Design:** Towards Morphogenetic Architecture. 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Graduate School Faculty of Engineering, Alexandria University, Alexandria (Egito), 2011.

AMBROSE, S. H. Paleolithic Technology and Human Evolution. **Science**, v. 291, n. 5509, p. 1748-1753, 2001.

AUNGER, R. What's special about human technology? **Cambridge Journal of Economics**, v. 34, n. 1, p. 115-123, 2009.

AUNGER, R. Types of technology. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 77, n. 5, p. 762-782, 2010.

BAR-COHEN, Y. (ed). **Biomimetics:** Biologically Inspired Technologies. Boca Raton: CRC Press, 2006.

BAR-COHEN, Y. (ed). **Biomimetics**: Nature Based Innovation. Boca Raton: CRC Press, 2012.

BASALLA, G. **The Evolution of Technology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

BENYUS, J. **Biomimicry:** Innovation Inspired by Nature. 2. ed. New York: HarperCollins e-books, 2002.

BIGGINS, P.; HILTZ, J.; KUSTERBECK, A. **Bio-inspired Materials and Sensing Systems**. Royal Society of Chemistry. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2011.

BOMPHREY, R.; TAULOR, G.; ADRIAN L. R. T. Smoke visualization of free-flying bumblebees indicates independent leading-edge vortices on each wing pair**. Experiments in Fluids**, v. 46, n. 5, p. 811-821, 2009.

CHEN, P.-Y; LIN, A. Y. M.; MCKITTRICK, J.; MEYERS, M. A. Structure and mechanical properties of crab exoskeletons. **Acta Biomaterialia**, v. 4, n. 3, p. 587-596, 2008.

DIAMOND, J. M. **Guns, Germs and Steel**. New York: W. W. Norton Company, 1998.

DOCZI, G. **O poder dos limites**. Harmonias e proporções na Natureza, Arte e Arquitetura. São Paulo: Mercuryo, 1990.

GEBESHUBER, I. C.; MAJLIS, B. Y.; STACHELBERGER, H. Biomimetics in Tribology. *In:* GRUBER, P.; BRUCKNER, D.; HELLMICH, C.; SCHMIEDMAYER, H. -B.; STACHELBERGER, H. GEBESHUBER, I. C. (eds.). **Biomimetics:** Materials, Structures and Processes. Examples, Ideas and Case Studies. Berlim: Springer-Verlag, 2011.

GRUBER, P.; BRUCKNER, D.; HELLMICH, C.; SCHMIEDMAYER, H.-B.; STACHELBERGER, H. GEBESHUBER, I. C. (eds.). **Biomimetics:** Materials, Structures and Processes. Examples, Ideas and Case Studies. Berlim: Springer-Verlag, 2011a.

GRUBER, P. Biomimetics in Architecture (Architekturbionik). *In:* GRUBER, P.; BRUCKNER, D.; HELLMICH, C.; SCHMIEDMAYER, H.-B.; STACHELBERGER, H. GEBESHUBER, I. C.; (eds.). **Biomimetics:** Materials, Structures and Processes – Examples, Ideas and Case Studies. Berlim: Springer-Verlag, 2011b.

HALDANE, J. B. S.; SMITH, J. M. **On being the right size and other essays**. Oxford: Oxford University Press, 1985.

HANSELL, M. **Built by Animals:** The natural history of animal architecture. Oxford: Oxford University Press, 2007.

HANSELL, M. **Animal Architecture**. Oxford: Oxford University Press, 2005.

HENSEL, M.; MENGES, A.; WEINSTOCK, M. Techniques and Technologies in Morphogenetic Design. **Architectural Design**, v. 78, n. 2, 2006.

HOWARD, T. J.; CULLEY, S. J.; DEKONINCK, E. Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. **Elsevier**, Bath, v. 29, n. 2, p. 160-180, 2008.

HU, T.; SHEN, L.; LIN, L.; XU, H. Biological inspirations, kinematics modelling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by Gymnarchus niloticus. **Mechanism and Machine Theory**, v. 44, n. 3, p. 633-645, 2009.

KARDONG, K. V. **Vertebrates:** comparative anatomy, function, and evolution. New York: McGraw-Hill, 2012.

KUHLMANN, D. Biomorphism in Architecture: Speculations on Growth and Form. *In*: GRUBER, P.; BRUCKNER, D.; HELLMICH, C.; SCHMIEDMAYER, H.-B.; STACHELBERGER, H. GEBESHUBER, I. C.; (eds.). **Biomimetics: Materials, Structures and Processes** – Examples, Ideas and Case Studies. Berlim: Springer-Verlag, 2011.

KULFAN, B. M.; COLOZZA, A. J. Biomimetics and Flying Technology. *In:* BAR-COHEN, Y. (ed.). **Biomimetics: Nature Based Innovation**. Boca Raton: CRC Press, 2012.

KROEBER, A. L. **American culture and the northwest coast**. New York; Toronto: Harcourt, Brace Collection robarts; Toronto Contributor Roberts – University of Toronto, 1923.

LIN, A.; MEYERS, M. A. Growth and structure in abalone shell. **Materials Science and Engineering: A**, v. 390, n. 1-2, p. 27-41, 2005.

MARCUS, G. **Kluge:** The Haphazard Construction of the Human Mind. Houghton Mifflin, 2008.

MCGHEE, G. R. **Convergent Evolution:** Limited Forms Most Beautiful. Cambridge: MIT Press, 2011.

MCGHEE, G. R. **The Geometry of Evolution:** Adaptive Landscapes and Theoretical Morphospaces. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

MEYERS, M. A.; CHEN, P.-Y.; LIN, A. Y.-M.; SEKI, Y. Biological materials: Structure and mechanical properties. **Progress in Materials Science**, v. 53, n. 1, p. 1-206, 2008.

MILLER, L. A. When vortices stick: an aerodynamic transition in tiny insect flight. **Journal of Experimental Biology**, v. 207, n. 17, p. 3073-3088, 2004.

MITCHAM, C. **Thinking through technology:** the path between engineering and philosophy. Chicago: The University of Chicago Press, 1994.

MORALES, L. R. **Para una teoria del diseño**. 1. ed. Mexico: Tilde Editores S.A., 1989.

PARVAN, M. I.; SCHWALMBERGER, A.; LINDEMANN, U. Application of basic design principles for solution search in biomimetics. *In:* 18th International Conference on Engineering Design, ICED'11, 22 jul. 2011, København. **Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design København**, p. 1-10, 2011.

PERUTZ, M. F. The Top Designer. *In:* **I wish I'd made you angry earlier:** essays on science, scientists, and humanity. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2003. cap. 2, p. 229-244.

POPPER, K. **Textos escolhidos**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2010.

POPPER, K. **The Poverty of Historicism**. 2. ed. London: Routledge Classics, 2002.

RUSE, M. **Darwin and Design:** Does Evolution Have a Purpose? Cambridge: Harvard University Press, 2004.

SANCHEZ, C.; ARRIBART, H.; GUILLE, M. M. G. Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems. **Nature materials**, v. 4, n. 4, p. 277-288, abr. 2005.

SCHULTZ, Brigitte; WERNER, Nachtigal; GÖRAN, Pohl. **„Die Natur zu kopieren ist völlig sinnlos." Interview mit Werner Nachtigal und Göran Pohl.** Bauwelt. [S. l.], 10 abr. 2023. Disponível em: https://www.bauwelt.de/themen/Die-Natur-zu-kopieren-ist-voellig-sinnlos-Interview-Werner-Nachtigal-Goeran-Pohl-Bionik-Architektur-2115402.html. Acesso em: 07 de set. 2023.

SUN, M. Dynamic flight stability of a hovering bumblebee. **Journal of Experimental Biology**, v. 208, n. 3, p. 447-459, 2005.

THOMAS, R. D. K.; REIF, W. E. The skeleton space: a finite set of organic designs. **Evolution**, v. 47, p. 341-360, 1993.

THOMPSON, D. W. **On growth and form**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

TIMOSHENKO, S. P. **History of Strength of Materials**. New York: McGraw-Hill Book Co., 1983.

USHERWOOD, J. R.; ELLINGTON, C. P. The aerodynamics of revolving wings I. Model hawkmoth wings. **Journal of Experimental Biology**, v. 205, n. 11, p. 1547-1564, 2002.

VANELLA, M.; FITZGERALD, T.; PREIDIKMAN, S.; BALARAS, E.; BALACHANDRAN, B. Influence of flexibility on the aerodynamic performance of a hovering wing**. Journal of Experimental Biology**, v. 212, n. 1, p. 95-105, 2008.

VATTAM, S. S.; HELMS, M. E.; GOEL, A. K. **Biologically Inspired Innovation in Engineering Design:** A Cognitive Study. Technical Report 20 S.S. Vattam, M.E. Helms, A.K. Goel, GIT-GVU-07–07, Graphics, Visualization and Usability Center, Georgia Institute of Technology, 2007.

VINCENT, J. F.V.; BOGATYREVA, O. A.; BOGATYREV, N. R.; BOWYER, A.; PAHL, A. **Biomimetics:** its practice and theory. Journal of The Royal Society Interface, v. 3, n. 9, p. 471-482, 2006.

VOGEL, S. **Comparative Biomechanics:** Life's Physical World. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2003.

GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS

Alegoria – Figura de linguagem que produz uma representação imagética do significado, facilitando a transmissão de ideias e sentidos desejados.

Antropomórfico – Com forma humana; semelhante ao homem (espécie); algo a que se atribui características humanas.

Artrópodes – Filo composto por animais invertebrados, que possuem exoesqueleto rígido e vários pares de apêndices articulados. Abrange os insetos, aracnídeos, crustáceos, quilópodes e diplópodes, sendo o filo com o maior número de representantes existentes.

Biomecânica – Ramo da ciência que estuda as relações, ações e reações físicas e mecânicas das estruturas biológicas ou seres vivos.

Bivalve – Molusco dotado de duas conchas (valvas), como as ostras e os mexilhões.

Cumulativo – Incremental; que acumula mudanças ou características ao longo do tempo.

Deletério – Combinação inviável ou cujas partes anulam uma à outra.

Desenvolvimental – Referente ao processo de desenvolvimento de um indivíduo desde a sua formação (fruto da reprodução).

Dorsoventral – Indicativo de direção: das costas (dorso) à região do abdômen (ventre/ventral).

Epigenética (ou herança epigenética) – Variações estruturais, conjuntos de informações ou caracteres dos indivíduos transmitidos por mecanismos contíguos ao código genético.

Fenótipo – Manifestações morfológicas, fisiológicas e comportamentais observadas em um indivíduo. Abrange (porém não se restringe a) expressão das características genéticas de um indivíduo.

Filogenia – Estudo da relação evolutiva entre grupos de organismos por meio de sequenciamento de dados moleculares e matrizes de dados morfológicos.

Fluido – Caracterização de meio físico que engloba gases e líquidos.

Fóssil – Palavra derivada do termo latino *fossilis* que significa "desenterrado" ou "extraído da terra". Caracteriza restos de seres vivos ou evidências de suas atividades biológicas preservados em diversos materiais (mais comumente no solo).

Framework – Termo da língua inglesa usado para designar o que chamamos de "quadro teórico".

Funcionalismo – Corrente de pensamento que atribui a forma de um objeto ou indivíduo às funções que este executa.

Gastrópode – Molusco geralmente dotado de uma concha helicoidal e que utiliza do pé (que compõe grande parte visível do seu corpo) para se locomover, como as lesmas e os caramujos.

Genótipo – Constituição genética de um indivíduo ou célula.

Hiperespaço – Espaço conceitual teórico capaz de compreender diversas dimensões.

Metabólico – Relativo ao metabolismo (conjunto de processos e fenômenos físicos e químicos intrínsecos a um organismo).

Molusco – Filo de animais invertebrados marinhos, de água doce ou terrestres, geralmente dotados de conchas, que compreende seres vivos como caramujos, mexilhões, ostras, lesmas, polvos e lulas.

Morfológico – Referente à morfologia (à forma evolutiva e desenvolvimental).

Multicelular – Ser vivo composto por múltiplas células.

Paramétrico – Relativo a um ou mais parâmetros (variáveis ou dimensões que compõem ou ajudam a produzir uma determinada forma ou característica).

Reprodução sexuada – Tipo de reprodução em que há troca/intercâmbio de material genético.

Tautologia – Argumento ou afirmação que se explica por (e se encerra em) si mesma; dizer a mesma coisa de duas formas diferentes de forma que uma pareça explicar a outra.

Teleologia – Orientado por um objetivo ou finalidade.

SOBRE A AUTORA

Gabriela Rabelo Andrade, mineira de Belo Horizonte, é designer industrial com uma paixão pelas áreas da natureza, seres vivos e tecnologia. Na confluência dessas áreas, encontrou alguns de seus temas de maior afinidade: bioinspiração e biomimética, vida artificial (A-Life) e otimização com algoritmos evolucionários.

Gabriela é PhD em Engenharia Mecânica pela Universidade de Leeds, no Reino Unido, onde desenvolveu pesquisa em algoritmos bioinspirados de forrageio aplicados à robótica no Instituto de Design, Robótica e Otimização (iDRO), e é mestre em Design, Inovação e Sustentabilidade pela Universidade do Estado de Minas Gerais, com pesquisa em bioinspiração e biomimética aplicadas ao design.

Foi pesquisadora e participou da criação do CBEIH (Centro de Bioengenharia de Espécies Invasoras de Hidrelétricas), do Instituto Teia e do Simoa/UFMG (Sistema Inteligente de Monitoramento das Águas). Tem mais de uma década de experiência em pesquisa e desenvolvimento nas áreas de bioengenharia, ecologia e tecnologia aplicada ao monitoramento ambiental.

Atualmente, dedica-se às áreas de ciência de dados, modelagem e inteligência artificial. Atua ainda como Especialista em Dados no iFood e é professora nos programas de pós-graduação da Faculdade Sirius (Master in Business and Technology in Data Science and AI) e no IBMEC (MBA em BI & Data Science).

Lattes: http://lattes.cnpq.br/7445655357089178

Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5272-097X

Este livro foi produzido pela Editora da Universidade do Estado de Minas Gerais (EdUEMG) em junho de 2024. O texto foi composto em Cairo, desenvolvida por Mohamed Gaber, e Noto Sans, por Google. Para obter mais informações sobre outros títulos da EdUEMG, visite o *site*: editora.uemg.br.

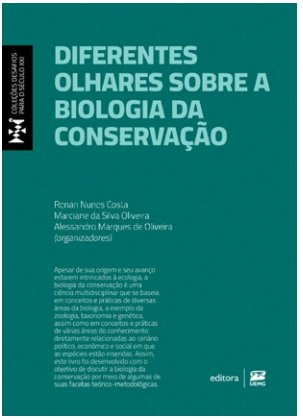
Confira outros títulos das coleções
Desafios para o Século XXI

Tecnologias vestíveis: memória e intimidade sobre o corpo

Autora:
Thatiane Mendes Duque

Acesse em: editora.uemg.br/catalogo

Este livro investiga as interações entre corpo, roupa e tecnologias vestíveis. Para tanto, a obra propõe tessituras sobre memória, auto-biografia e intimidade. Ao discutir as tecnologias vestíveis, como relógios inteligentes e óculos de realidade virtual ou aumentada, o texto se propõe a pensar de que maneiras a tecnologia permite a ressignificação contínua do contato, do afeto e do desejo.



Diferentes olhares sobre a biologia da conservação

Organizadoras:
Renan Nunes Costa
Marciane da Silva Oliveira
Alessandro Marques de Oliveira

Acesse em: editora.uemg.br/catalogo

Esta coletânea busca aproximar os pesquisadores e o grande público de conceitos caros à biologia da conservação. Para tanto, apresenta diferentes abordagens teórico-metodológicas da área e situa suas principais discussões. Entre as temáticas propostas, foram abordadas a conservação da biodiversidade e dos ecossistemas, a preservação de recursos genéticos e as contribuições da ecologia para a biologia da conservação.